

TESIS DOCTORAL

**APLICACIONES DE LA
FOTOGRAMETRÍA DE BAJO
COSTE AL ESTUDIO DE
PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO
Y ARQUITECTÓNICO**

Simón Peña Villasenín

ESCOLA DE DOUTORAMENTO INTERNACIONAL

PROGRAMA DE DOUTORAMENTO EN ENXEÑARÍA PARA O DESENVOLVEMENTO
RURAL E CIVIL

SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO

2019



AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

Dra. Dña. M^a Luz Gil Docampo y Dr. D. Juan Ortiz Sanz,
Profesores Titulares del Departamento de Ingeniería
Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela

Como Directores de la Tesis Doctoral titulada:
APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA DE BAJO
COSTE AL ESTUDIO DE PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO
Y ARQUITECTÓNICO.

Por la presente **DECLARAMOS:**

Que la tesis presentada por D. Simón Peña Villasenín

Es idónea para ser presentada, de acuerdo con el artículo 41
del Reglamento de *Estudios de Doctorado*.

Lugo, 1 de Julio de 2019.

Fdo. Dra. Dña. M^a LUZ GIL DOCAMPO

Fdo. Dr. D. JUAN ORTIZ SANZ



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización de la presente tesis doctoral, en especial a los directores Dra. M^aLuz Gil y Dr. Juan Ortiz, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma, pero sobre todo por la motivación y apoyo recibidos a lo largo de estos años.

De forma especial quiero agradecer a mis padres, porque siempre me han ayudado y apoyado en todas mis decisiones y porque han sido y son un ejemplo y referencia; al resto de mis familiares y amigos cercanos, a los cuales prometo dedicar el tiempo que les debo ahora que finalizo esta etapa de mi vida en la que he estado tan ocupado; y a mi abuelo Gonzalo, a quién le dedico esta tesis.

A los miembros del *Colectivo A Rula* por su labor en la difusión y defensa del patrimonio gallego, y en lo personal, por su colaboración en esta tesis y por enseñarme a apreciar la magnitud cultural del fenómeno del *Arte Rupestre “Atlántico”*.

Finalmente, me gustaría agradecer a la USC, y extender ese agradecimiento al grupo de investigación CIGEO por acogerme en esta etapa de formación como investigador, así como a la Xunta de Galicia por aportar parte de la financiación necesaria para el desarrollo de este proyecto, bajo el programa operativo FSE Galicia 2014-2020 (2016).

A todos ellos, muchas gracias.



APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA DE BAJO COSTE AL ESTUDIO DE PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO Y ARQUITECTÓNICO

RESUMEN

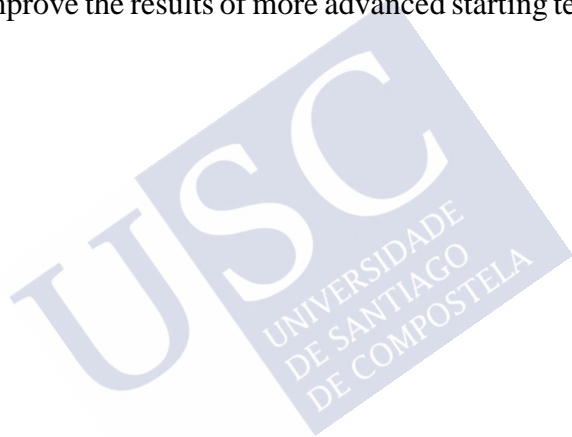
Esta tesis se enmarca en el campo de la documentación fotogramétrica de patrimonio arquitectónico y arqueológico, y muestra que en determinadas circunstancias esta documentación puede ser llevada a cabo de un modo colaborativo, por parte de profesionales y aficionados con medios y conocimientos limitados. Con el objetivo de evaluar la variabilidad metodológica de la fotogrametría *SfM* en términos de calidad geométrica, calidad visual, rendimiento y accesibilidad técnica, se testean flujos de trabajo simples y de bajo coste, que permiten obtener modelos 3D en situaciones complejas y mejoran los resultados de técnicas de partida más avanzadas como el *TLS*.

RESUMO

Esta tese enmarcase no campo da documentación fotogramétrica de patrimonio arquitectónico e arqueolóxico, e mostra que en determinadas circunstancias esta documentación pode ser levada a cabo de un modo colaborativo, por parte de profesionais e afeccionados con medios e coñecementos limitados. Co obxectivo de avaliar a variabilidade metodolóxica da fotogrametría *SfM* en termos de calidade xeométrica, calidade visual, rendemento e accesibilidade técnica, téstanse fluxos de traballo simples e de baixo coste, que permiten obter modelos 3D en situacións complexas e melloran os resultados de técnicas a priori máis avanzadas como o *TLS*.

ABSTRACT

This thesis is part of the field of photogrammetric documentation of architectural and archaeological heritage, and shows that in certain circumstances professionals and amateurs with limited means and knowledge can carry out this documentation in a collaborative way. With the aim of evaluating the methodological variability of *SfM* photogrammetry in terms of geometric quality, visual quality, performance and technical accessibility, simple and low-cost workflows are tested, which allow obtaining 3D models in complex situations and improve the results of more advanced starting techniques such as *TLS*.



ÍNDICE

1. ESTRUCTURA DE LA TESIS	23
2. JUSTIFICACIÓN	25
3. INTRODUCCIÓN	31
3.1. Documentación geométrica del patrimonio.....	31
3.2. Fotogrametría <i>SfM</i>	36
3.3. Variabilidad metodológica de la fotogrametría <i>SfM</i>	38
3.4. Evaluación de las variables metodológicas de la fotogrametría..	46
4. OBJETIVOS	55
5. CAPITULO I	59
5.1. Introducción.....	61
5.2. Algoritmos Structure from Motion (SfM).....	63
5.3. Toma fotográfica	65
5.4. Metodología.....	68
5.5. Resultados y discusión	81
5.6. Conclusiones.....	89
6. CAPITULO II	95
6.1. Introducción.....	97
6.2. Metodología.....	102
6.3. Discusión de resultados.	117
6.4. Conclusiones.....	127
7. CAPITULO III	129
7.1. Introducción y objetivos	131
7.2. Metodología.....	134
7.3. Resultados y discusión	142
7.4. Conclusiones.....	150

8. CAPITULO IV	161
8.1. Introducción	163
8.2. Metodología	167
8.3. Resultados y discusión	175
8.4. Conclusiones	190
9. CONCLUSIONES	193
10. BIBLIOGRAFÍA	203



APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA DE BAJO COSTE AL ESTUDIO DE PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO Y ARQUITECTÓNICO

RESUMEN

El 16 de noviembre de 1972, la “Convención para la protección del Patrimonio Cultural y Natural del Mundo”, fue adoptada por la “Conferencia General de la UNESCO” con el objetivo de promover la identificación, protección y preservación del patrimonio cultural y natural de todo el mundo. En el ámbito autonómico, entre los retos prioritarios establecidos en las “Estrategias para la Especialización Inteligente de Galicia”, se encuentra el desarrollo tecnológico en la puesta en valor del patrimonio cultural, tanto en la gestión de contenidos, como en su digitalización o catalogación. Para alcanzar estos objetivos, resulta esencial documentar geométricamente el patrimonio cultural, es decir, adquirir, procesar, presentar y registrar los datos necesarios para la determinación de la posición, la forma y el tamaño de un monumento en el espacio tridimensional. Las técnicas tradicionales de documentación geométrica de patrimonio, convergen actualmente hacia técnicas de adquisición de datos métricos masivas que permiten obtener modelos 3D que proporcionan un registro geométrico y radiométrico de alta resolución, aportando una documentación del patrimonio mucho más completa, rigurosa y adecuada que la proporcionada por las técnicas tradicionales.

En concreto, la fotogrametría de rango cercano ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas principalmente gracias al desarrollo de los algoritmos *Structure from Motion (SfM)*, los cuales propiciaron su expansión como método de documentación patrimonial. No obstante, su aplicación para la documentación de elementos arquitectónicos no siempre es sencilla, en especial cuando las

limitaciones de espacio en la escena de trabajo son extremas como ocurre habitualmente en los cascos históricos de las ciudades donde se ubica la mayoría de casos. Otro ejemplo de dificultades en la aplicación de estas tecnologías, la encontramos en el patrimonio de tipo arqueológico, concretamente en el arte rupestre al aire libre o petroglifos, los cuales además de geometrías complejas que dificultan la aplicación de estos métodos de registro, requieren tratamientos específicos que permitan registrar grabados no detectables a simple vista. Además, la abundancia y dispersión de ambos tipos de patrimonio en Galicia, hace que su documentación no sea viable solo por medios profesionales avanzados. Por ello es importante el desarrollo de metodologías sencillas y de bajo coste, que sean accesibles a profesionales, o incluso a aficionados, no expertos en métodos de modelado 3D.

La presente tesis doctoral se enmarca en el campo de la documentación fotogramétrica de elementos patrimoniales por parte de técnicos y aficionados con medios y conocimientos limitados en una tecnología cada día más a su alcance. Dada la variabilidad metodológica que presenta actualmente la fotogrametría *SfM*, el objetivo principal de esta tesis es evaluar diferentes flujos de trabajo fotogramétrico de bajo coste para modelado 3D de patrimonio arquitectónico en cascos históricos y de muestras de arte rupestre al aire libre, analizando los resultados obtenidos fundamentalmente en términos de calidad geométrica, calidad visual, rendimiento y accesibilidad técnica, mostrando la fotogrametría *SfM* como una tecnología accesible a perfiles no expertos en la adquisición de datos 3D.

En los casos de estudio de patrimonio arquitectónico en cascos históricos, las metodologías descritas permite obtener modelos 3D de calidad, incluso en situaciones extremas donde la aplicación de metodologías estandarizadas no son aplicables debido a las limitaciones del espacio de trabajo; En lo referente a las tareas de documentación geométrica de petroglifos, los flujos de trabajo descritos, mejoran los resultados y rendimientos de técnicas a priori más avanzadas como el *TLS*. Además, se define un flujo de trabajo completo mediante *software* gratuito en todo el proceso, basado en la

aplicación de fotogrametría *SfM*, renderizados de realce y vectorización automática, que permite documentar un número elevado de petroglifos en un periodo corto de tiempo, siendo además capaz de registrar de modo objetivo grabados de arte rupestre “Atlántico” que los métodos tradicionales no consiguen detectar.

Capítulo 1: Modelado 3D de fachadas históricas mediante fotogrametría *SfM*. Documentación geométrica de distintas tipologías arquitectónicas de un casco histórico

El patrimonio arquitectónico o inmueble se define por la UNESCO (1972) como los monumentos, conjuntos de edificios o lugares, con un valor excepcional desde el punto de vista de la historia, el arte o la ciencia. Al igual que para otras tipologías patrimoniales, en el estudio del patrimonio arquitectónico es fundamental la topografía y los métodos de documentación geométrica. El desarrollo de técnicas de documentación avanzadas como el *TLS* o la fotogrametría *SfM* adquiere gran relevancia, ya que permite realizar una efectiva restauración en caso de deterioro o destrucción parcial o total, el replicado del mismo, o un poder de análisis y estudio de mayor grado. Además, los edificios históricos no se ajustan a formas geométricas sencillas, especialmente en fachadas significativas donde además de los posibles defectos constructivos, es habitual la presencia de esculturas, relieves o grabados en piedra, entre otros elementos con formas complejas. En estos casos, las técnicas de adquisición masiva de datos son imprescindibles.

La metodología de adquisición de modelos 3D de edificios de centros históricos se estudió en el capítulo 1 de esta tesis, titulado “Modelado 3D de fachadas históricas mediante fotogrametría *SfM*. Documentación geométrica de distintas tipologías arquitectónicas de un casco histórico”. En este capítulo, se analiza uno de los principales factores que afectan a la calidad de los resultados en la aplicación de técnicas fotogramétricas para el modelado 3D de elementos patrimoniales, como es la limitación de espacio en la escena de trabajo. Estudios previos muestran la confiabilidad de la fotogrametría *Structure from Motion (SfM)* cuando el objeto está ubicado en un

espacio grande y accesible; sin embargo, en cascos históricos, la toma fotográfica debe adaptarse a las limitaciones de espacio particulares de cada ubicación.

El centro histórico de Santiago de Compostela (España) ha sido elegido para este estudio, seleccionando cuatro casos representativos de diferentes tipologías urbanas: “fachada significativa”, “fachada en una calle estándar”, “calle estrecha” (relación entre ancho de calle y alto de fachada menor que 1/3) y “fachada con soportales”.

En los dos primeros casos de estudio, fachada significativa, y fachada en calle estándar, el espacio no era un factor limitante, obteniéndose resultados satisfactorios en ambos, incluso en el segundo caso, donde se utilizó la cámara integrada en un *Phone* como dispositivo de toma. En el tercer y cuarto caso de estudio, fachada en calle estrecha y fachada con soportales, las limitaciones de espacio impedían la aplicación de disposiciones de imágenes estandarizadas, por lo que se adoptaron soluciones ingeniosas, extrapolables a tipologías similares, y que permitieron obtener una reconstrucción de la escena geométrica y visualmente correcta.

Capítulo 2: Comparación de *software* desktop profesional y *software* gratuito *cloud computing* en el modelado 3D de edificios históricos: Monasterio de San Martín Pinario

Cuatro factores destacan en la evolución de la fotogrametría *SfM* y que han propiciado que en las últimas décadas, se haya establecido como un método de adquisición de datos 3D en el campo del patrimonio, la arquitectura, la ingeniería y la construcción entre otros. En primer lugar el desarrollo de los algoritmos de identificación automática de puntos homólogos, *Scale-Invariant Feature Transform* (*SIFT*), los cuales han permitido que la identificación de los puntos homólogos sea automática. En segundo lugar, la automatización del proceso de calibración mediante el cálculo inverso de los parámetros de orientación internos y externos de las cámaras a partir del algoritmo de ajuste *Bundler*, capaz de realizar este proceso en un solo paso, sin la necesidad de una calibración previa de la cámara. En tercer lugar, la

posibilidad de obtener una nube de puntos de mayor densidad implementando el algoritmo *Clustering view for Multiview Stereo (CMVS)* y *Patch-based Multiview Stereo (PMVS2)*. La aparición de estos algoritmos nos ha permitido mediante un proceso automatizado, obtener nubes de puntos, mallas de triángulos y posteriormente un modelo texturizado tridimensional completo. En cuarto lugar, las capacidades de computación, especialmente incrementadas debido a la aparición de la computación “en la nube” o *cloud computing*.

Estos avances hacen que la fotogrametría sea una técnica “viva”, ya que la evolución constante de las versiones de *software* integrando mejoras en los algoritmos, justifica un análisis periódico de los resultados de la misma. Las distintas opciones de *software* de procesamiento fotogramétrico se analizan en este capítulo, en donde el procesamiento con *software* fotogramétrico profesional (*PhotoScan* y *Pix4D*), se compara con el procesamiento con *software* fotogramétrico de bajo coste (*Autodesk Remake*), para el levantamiento de fachadas de edificios históricos.

El objetivo principal es analizar la precisión de los resultados obtenidos, así como la facilidad de uso y accesibilidad de distintas opciones de *software* fotogramétrico. En este caso, el modelado 3D se testea sobre una colección de imágenes de la fachada de San Martín Pinario, el segundo monasterio más grande de España. Tras un análisis de los resultados de procesamiento, la calidad y precisión geométrica, los resultados visuales y la utilidad operacional de las distintas opciones de *software*, se muestra que el *software* de computación “en la nube” ofrece modelos 3D con calidad y precisión visual similares a los obtenidos con el *software* de escritorio. El ahorro de costes y la facilidad de uso de este, hacen que la computación fotogramétrica “en la nube” sea una excelente opción como herramienta de medición 3D ágil y económica, para los profesionales del patrimonio y la construcción que no son especialistas en fotogrametría.

Capítulo 3: Comparación de *TLS* y fotogrametría *SfM* para el modelado 3d de arte rupestre y la aplicación del realce *Radiance Scaling Shader* para la detección de grabados

El conjunto arqueológico gallego de arte rupestre constituye una expresión artística significativa de las comunidades que habitaron estas tierras en la edad de bronce catalogados dentro de la familia de arte rupestre “Atlántico”, estos petroglifos tienen una fuerte personalidad que los hace reconocibles entre muchos otros. Considerando el número y la calidad de los diseños, el arte rupestre gallego es una de las manifestaciones culturales más importantes de este tipo en Europa.

El inventario geométrico y la documentación del arte rupestre es complejo debido a la gran cantidad de petroglifos presentes en el territorio, la distancia entre ellos, en muchos casos el estado de abandono de las áreas forestales, las limitaciones de acceso y las características geométricas de este patrimonio, en el que predominan grabados poco profundos en muchos casos altamente erosionados, que hacen del arte rupestre gallego un fenómeno difícil de documentar.

Este complejo registro ha dado lugar a documentaciones e interpretaciones parciales del conjunto de arte rupestre gallego. En la mayoría de los casos la única documentación existente es una descripción textual y su geolocalización aproximada, lo que deriva en una interpretación parcial del fenómeno. La documentación geométrica de todo el patrimonio rupestre no es factible por razones técnicas y económicas, y al mismo tiempo, esta documentación es una tarea muy necesaria debido al alto riesgo de deterioro del mismo, ya que estas muestras de arte rupestre al aire libre, están totalmente expuestas a múltiples agentes externos.

En las últimas décadas, la fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*) se posicionó como una técnica óptima para la documentación patrimonial, pero esta técnica tiene una gran variabilidad en su metodología y coste de ejecución. La metodología de adquisición de modelos 3D de petroglifos se estudia en el capítulo 3 titulado “Comparación de *TLS* y fotogrametría *SfM* para el modelado 3D de arte rupestre y la aplicación del realce *Radiance Scaling Shader* para la detección de grabados”. En este estudio, se desarrolla un método

muy simple y eficaz basado en la fotogrametría *SfM* con *software* de computación “en la nube” de bajo coste, el cual se somete a análisis mediante 3 experimentos:

En primer lugar, la comparación de sus resultados con los obtenidos con un escáner láser terrestre (*TLS*) de última generación para la documentación 3D de un mismo petroglifo, en este caso el *PT de O Castriño de Conxo*, Santiago de Compostela. Las mallas se comparan mediante el análisis de criterios visuales, geométricos y operacionales y su adaptación para la aplicación del renderizado de grabados *Radiance Scaling Shader*.

A continuación, la documentación de diferentes petroglifos aún no documentados geoméricamente se realizó en un área geográfica con un radio de 6 km. Sus localizaciones se muestran en la Figura 1 (Punto 2). La metodología de la documentación fue la toma fotográfica simple con una cámara convencional. Esta tarea fue realizada por un técnico con 5 años de experiencia en fotogrametría terrestre, con el objetivo de evaluar el número de elementos que podrían documentarse en una jornada de campo.

Finalmente, la metodología desarrollada es probada en varias ubicaciones con muestras de arte rupestre no documentadas por métodos 3D hasta la fecha, con la particularidad de que en estos casos, la toma fotográfica fue realizada por miembros del *Colectivo A Rula* no expertos en esta tecnología.

Los resultados muestran que con una metodología de fotogrametría *SfM*, que es muy simple y accesible a perfiles no expertos, es posible obtener mejores resultados en aspectos geométricos y visuales que los obtenidos con *TLS*, siendo estos válidos para un análisis detallado de arte rupestre y que por tanto, permite de un modo colaborativo una documentación masiva del fenómeno que no es posible exclusivamente por medios profesionales. El flujo de trabajo descrito mostró además, un gran rendimiento, permitiendo a una sola persona en una única jornada de campo la documentación de hasta 20 muestras de arte rupestre dispersas en un radio de 6km.

Capítulo 4: Una metodología de trabajo simple y de bajo coste al alcance de múltiples perfiles para el modelado 3D y vectorización automatizada de grabados de arte rupestre “Atlántico”

Actualmente, solo en Galicia, hay catalogados más de 3000 petroglifos, sin embargo, la mayoría de ellos aún no se han documentado geométricamente. A pesar de los avances técnicos de los últimos años en tecnologías 3D, el inventario geométrico y la documentación del arte rupestre en Galicia continúan presentando muchos desafíos, en especial debido a la gran cantidad de petroglifos presentes en el territorio. La fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*) se ha mostrado como una técnica óptima para la documentación de este tipo de patrimonio, no obstante se acostumbra a utilizar flujos de trabajo complejos que requieren el empleo de instrumental topográfico, pértigas, drones o *software* de pago, por lo que su coste de ejecución y accesibilidad se reduce notablemente, haciendo inviable su aplicación de modo masivo.

Además, debido a la sinuosidad de algunos grabados, es necesario utilizar métodos de realce para obtener una mejor visualización de los mismos. En este sentido en los últimos años, métodos desarrollados por las comunidades de computación gráfica, que se basan en el análisis morfológico de los modelos 3D, han sido utilizados en la detección de grabados, mostrando resultados satisfactorios en el análisis de arte rupestre al permitir entre otras posibilidades la obtención automatizada de calcos vectoriales.

La aplicación de los renderizados de realce sobre modelos 3D obtenidos mediante fotogrametría *SfM*, se estudia en profundidad el capítulo 4 titulado, “Una metodología de trabajo simple y de bajo coste al alcance de múltiples perfiles para el modelado 3D y vectorización automatizada de grabados de arte rupestre Atlántico”. El principal objetivo de este estudio es el desarrollo de un flujo de trabajo completo, sencillo y de bajo coste, para el análisis objetivo de grabados rupestres, el cual consta de tres pasos principales. En primer lugar la obtención de un modelo 3D de alta resolución geométrica a partir de la metodología desarrollada en el capítulo anterior. En segundo lugar, el

realizado de los grabados a partir de la aplicación de los renderizados *Radiance Scaling Shader*. Finalmente, la publicación directa de los modelos 3D realizados, a través de la plataforma *Sketchfab*, o la extracción del calco digital automatizada a partir de un proceso de sobreexposición y subexposición de capturas 2D del modelo realizado y su vectorización automática a partir del servicio online gratuito “*Vectorizer*” (Massow, 2015).

El experimento, constó en el estudio de las distintas variables de configuración de las tres fases de trabajo sobre un petroglifo que engloba la mayoría de tipologías de grabado de la familia de arte rupestre “Atlántico” como es el petroglifo de *Fontão do Eido* en Verdoejo, Valença do Minho (Portugal). Posteriormente, tras analizar los resultados de las distintas variables de del proceso, se determina un flujo de trabajo optimizado, cuyo rendimiento fue sometido a análisis sobre otras muestras de arte rupestre.

Todas las sesiones fotográficas fueron realizadas por aficionados al patrimonio pertenecientes al *Colectivo A Rula* de Santiago de Compostela, demostrando que el uso de estas técnicas avanzadas de adquisición de datos 3D, son accesibles para todos los perfiles debido a su bajo coste de ejecución y facilidad de uso. Este estudio muestra que el flujo de trabajo desarrollado, permite la documentación geométrica de un fenómeno cultural de registro complicado como son los sutiles grabados de arte rupestre “Atlántico”, de un modo colaborativo y con suficiente poder analítico para obtener interpretaciones objetivas de los mismos.

Además, la publicación directa de modelos 3D realizados es posibles gracias a plataformas como *Sketchfab*, permitiendo mostrar el arte rupestre de un modo más evidente, atractivo y moderno. Este modo de difusión aporta mayor objetividad en el análisis de arte rupestre, ya que las interpretaciones a partir del estudio directo sobre los modelos 3D, no están afectadas por errores derivados de la proyección de la información tridimensional del grabado, en un formato de representación bidimensional, lo que es de gran relevancia para el estudio de las adaptaciones morfológicas de los diseños a la roca.



TESIS DOCTORAL

**APLICACIONES DE LA
FOTOGRAMETRÍA DE BAJO
COSTE AL ESTUDIO DE
PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO
Y ARQUITECTÓNICO**

Simón Peña Villasenín

ESCOLA DE DOUTORAMENTO INTERNACIONAL

PROGRAMA DE DOUTORAMENTO EN ENXEÑARÍA PARA O DESENVOLVEMENTO
RURAL E CIVIL

SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO

2019



1. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Tras una justificación del interés de la investigación desarrollada en esta tesis, se aborda la sección introductoria, en la cual, en primer lugar, se describen las necesidades técnicas y métodos tradicionales empleados en la documentación geométrica tanto de patrimonio arquitectónico como arqueológico, así como las ventajas que suponen los métodos modernos de modelado 3D en esta labor. A continuación se profundiza en la metodología de modelado 3D denominada fotogrametría *Structure from Motion (SfM)* y se describen las variables metodológicas presentes en la técnica y los principales indicadores a considerar para su análisis en términos de precisión geométrica, calidad visual, rendimiento y accesibilidad. A continuación se plantea el objetivo general y los específicos de esta tesis y se exponen, en diferentes capítulos, los cuatro casos de estudio que se han desarrollado para alcanzar dichos objetivos:

- **Capítulo I. Modelado 3d de fachadas históricas mediante fotogrametría SfM. Documentación geométrica de distintas tipologías arquitectónicas de un casco histórico.**

Capítulo publicado en *Journal of Architectural Heirtage*

(Peña-Villasenín et al., 2017)

Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2017). 3D Modelling of Historic Facades Using *SfM* Photogrammetry Metric documentation of different building types of a historic centre. *International Journal of Architectural Heritage*.

<https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1317884>

- **Capítulo II. Comparación de *software* desktop profesional y *software* gratuito *cloud computing* en el modelado 3d de edificios históricos: Monasterio de San Martín Pinario (Capítulo II)**

Pendiente de revisión por pares en la revista:

Measurement. ISSN: 0263-2241.

- **Capítulo III. Comparación de *TLS* y fotogrametría *SfM* para el modelado 3d de arte rupestre y la aplicación del realce *Radiance Scaling Shader* para la detección de grabados.**

Capítulo publicado en *Journal of Cultural Heirtage*

(Peña-Villasenín et al., 2018)

Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2018). Professional *SfM* and *TLS* vs a simple *SfM* photogrammetry for 3D modelling of rock art and *Radiance Scaling* shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*.

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.10.009>

- **Capítulo IV. Una metodología de trabajo simple y de bajo coste al alcance de múltiples perfiles para el modelado 3D y vectorización automatizada de grabados de arte rupestre “Atlántico”.**

Pendiente de publicación en la revista:

Archaeological Prospection. ISSN: 1099-0763.

Posteriormente, se presentan las principales conclusiones extraídas del estudio y, finalmente, se indica la bibliografía empleada en cada caso de estudio así como en el resto del documento.

2. JUSTIFICACIÓN

En la convención de la UNESCO del 1972, se establece la necesidad imprescindible de la documentación geométrica del patrimonio cultural con el objetivo de promover la identificación, protección y preservación del mismo. Como se observa en la figura 1, en Galicia hay presente una abundante riqueza patrimonial con una gran dispersión territorial. Según el Plan Básico Autonómico (PBA, 2018), hay catalogados aproximadamente 57.000 elementos patrimoniales, de los cuales cerca de los 40.000 son de tipo arquitectónico (Figura 1-A), si se integran en este grupo tanto los bienes de interés artístico como etnográfico, y más de 17.000 de tipo arqueológico (Figura 1-B). Estos elementos de patrimonio arquitectónico y arqueológico, como los cascos históricos o las muestras de arte rupestre al aire libre, se encuentran habitualmente expuestos a agentes externos dañinos que comprometen su preservación en el tiempo. Esta situación, se agrava en la comunidad gallega debido al gran número y dispersión de los elementos patrimoniales y por factores como la despoblación rural; el abandono o la dedicación a cultivos intensivos de las zonas forestales; incluso el propio desconocimiento de la presencia del mismo por parte de la población local.

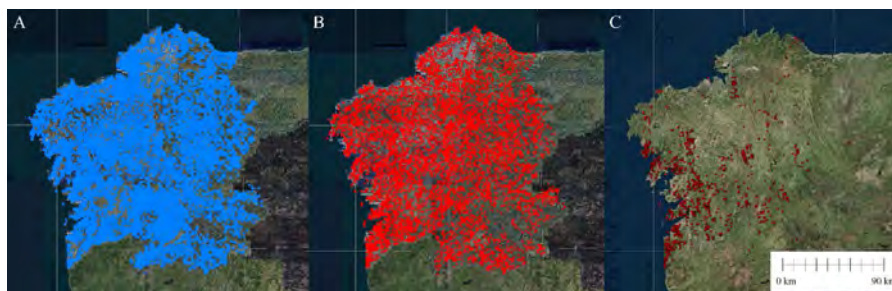


Figura 1. Cartografía obtenida a partir de la información incluida en el Plan Básico Autonómico (PBA, 2018). (A) Patrimonio arquitectónico. (B) Patrimonio arqueológico. (C) Yacimientos de arte rupestre.

El patrimonio arquitectónico de cascos históricos

Gran parte del patrimonio arquitectónico, se agrupa en los centros históricos de las ciudades y pueblos. Según el *Comité de Patrimonio Mundial de la UNESCO* en la *Convención de La Haya para la protección de los Bienes Culturales en caso de Conflicto Armado*, (La Haya, 1954), se denomina centro o casco histórico al núcleo urbano original de planeamiento y construcción de un área urbana, generalmente el de mayor atracción social, económica, política y cultural, que se caracteriza por contener los bienes vinculados con la historia de una determinada ciudad, a partir de la cultura que le dio origen. Se trata de una zona aún viva, es decir, en la ciudad histórica todavía concurren actividades de vida propias que se resisten a los procesos de desplazamiento. La capacidad de carga o de intervención que sostienen los centros históricos vivos es muy limitada, las intervenciones para dotar a la población de servicios actualizados son de difícil ejecución; por este motivo en ocasiones el abandono de las zonas residenciales históricas no se hace por sustitución de funciones, sino por la ausencia de tejido social. Pasan a ser zonas deprimidas, desiertas incluso en estado de ruina. El resultado del mismo son ciudades históricas despobladas. La necesidad de que los cascos históricos sean adecuadamente conservados como legado común nace en primer lugar como herencia histórica a conservar, y por consiguiente, su inventariado y caracterización para enfrentar de manera más efectiva su conservación se hace imprescindible; pero también como posible objeto de intervención urbanística (ej. dotación de servicios, rehabilitación de viviendas, restauraciones, derribos) con el fin de evitar la desaparición de su tejido social; o incluso como producto generador de riqueza para el sector turístico (Jamal & Orbasli, 2008). En ocasiones, la abundancia de estos elementos patrimoniales y las limitaciones en medios económicos y técnicos hacen inviable afrontar de manera efectiva la documentación del mismo. La conservación de este patrimonio depende en gran medida de que los profesionales encargados de dicha tarea, habitualmente limitados en medios y conocimientos técnicos, cuenten con herramientas accesibles en coste y facilidad de uso, que les permitan realizar las labores cotidianas que requiere la documentación arquitectónica patrimonial (Yilmaz et al.,

2007). En otras ocasiones, en las que los elementos patrimoniales son destruidos sin documentación previa, el único medio posible para la restauración es su documentación en base a imágenes tomadas por los visitantes que lo “registraron” antes dicha destrucción (Grün et al., 2004; Snively et al., 2006, 2008).

Arte rupestre en Galicia

Los yacimientos arqueológicos pertenecientes a todo tipo de adscripción cultural, se encuentran expuestos a agentes externos que los ponen en riesgo de deterioro, siendo especialmente delicado el estado de conservación de muchas de las muestras de arte rupestre “Atlántico” de Galicia y Norte de Portugal. Estos yacimientos del grupo de grabados rupestres del tipo “al aire libre” (Varela, 1982), además del deterioro que sufren debido a los agentes climatológico, se sitúan habitualmente en zonas forestales intensivas, que incluso en ocasiones son afectadas por incendios que degradan enormemente los grabados por procesos como la termoclastia (Carrera Ramírez et al., 1994); o incluso por actos vandálicos como evidencia la reciente agresión que ha sufrido el petroglifo de *O Castriño de Conxo*, una de las muestras más representativas del arte rupestre gallego (*17 de mayo de 2019, La Voz de Galicia*).

La investigación de este fenómeno es relativamente reciente, especialmente sesgada (Carrera Ramírez et al., 1994; Veiga, 2005) al situarse la mayoría de elementos catalogados en la provincia de Pontevedra (Buhigas-Sobrino, 2000) e incompleta (Rodríguez Rellán et al., 2018). Prueba de ello, es que cada año en Galicia y norte de Portugal, numerosas muestras de arte rupestre son todavía descubiertas. A pesar de esto, la concentración de arte rupestre en Galicia documentada, es ya de gran relevancia (Figura 1-C), siendo aproximadamente 2700 las muestras oficialmente catalogadas según el Plan Básico Autonómico (PBA, 2018). Algunos autores aseguran que esta cifra es de largo superior a las 3000 (Rodríguez Rellán et al., 2018). Los petroglifos o grabados rupestres de nuestra comunidad, se integran dentro de la familia del arte rupestre “Atlántico” y teniendo en cuenta tanto el número como la complejidad de sus diseños, puede afirmarse que el arte rupestre gallego se encuentran entre las manifestaciones

culturales de este tipo más destacadas de Europa. Fenómenos culturales de similares características, son declarados patrimonio de la humanidad en otras zonas geográficas como en el caso de *Tanum* en Suecia, *Alta* en Noruega, el *Val Camónica* en Italia o el *Val de Cõa* en Portugal. Afrontar de manera efectiva la protección, divulgación, difusión y explotación turística de este recurso cultural, es en la actualidad todavía un reto en nuestra comunidad.

Ante esta situación, han surgido en los últimos años asociaciones y colectivos de aficionados al estudio de distintos tipos de elementos patrimoniales y especialmente del arte rupestre, que promueven la defensa y divulgación de los mismos como principal dinámica para su conservación. Ejemplo de ello es la asociación de aficionados al arte rupestre *Colectivo A Rula* de Santiago de Compostela y que ha realizado en los últimos años una importante labor promoviendo la protección y difusión del patrimonio rupestre de Galicia y Norte de Portugal. Organizaciones como *Capitán Gosende* de *Cercedo* (Pontevedra), el *Grupo de Arqueoloxía Terras de Trasancos* de Betanzos (A Coruña), *Codeseda Viva* de A Estrada (Pontevedra), *Colectivo Patrimonio dos Ancares* (Lugo), o *patrimoniogalego.net* en Pontevedra, son ejemplos de otras entidades sociales que han promovido en los últimos años la protección del patrimonio cultural de Galicia y en concreto del arte rupestre “Atlántico” gallego. La labor de estos colectivos sociales es necesaria para llevar a cabo estas tareas de catalogación patrimonial que no serían viables exclusivamente por medios profesionales. Una corriente cultural, que gracias a las redes sociales y al alto grado de concienciación de las nuevas generaciones tiende a expandirse en el futuro.

Documentación geométrica del patrimonio

La conservación del patrimonio requiere tareas como la documentación geométrica del mismo, disponer de información precisa y actualizada de la forma, características, materiales y análisis estructural del patrimonio es un requisito indispensable para su correcta conservación (Genovese, 2005). Tradicionalmente, los métodos de documentación geométrica de carácter manual fueron los más empleados en documentaciones patrimoniales de todo tipo (Lodeiro-

Pérez, 1995), no obstante su aplicación, es tediosa y además acostumbra a implicar una importante pérdida de información durante la fase de transferencia de datos desde el elemento real al modelo teórico (Yilmaz et al., 2007). En lo referente a grabados rupestres, los métodos tradicionales de documentación geométrica (Arias et al., 2007) acostumbran además a ser agresivos al requerir no solo el contacto directo con el soporte, si no también interacción física con el mismo. Se tratarían de técnicas ampliamente empleadas para la documentación de petroglifos en Galicia como el *Frotage* o el calco con plástico (Arcà, 2006; González-Aguilera et al., 2009; Lewis-Williams & Páger, 1990; Moneva Montero, 1993). Otras metodologías tradicionales más avanzadas, como los métodos topográficos, ven limitada su funcionalidad cuando el elemento a estudiar presenta formas irregulares no asimilables a formas geométricas sencillas (Barazzetti et al., 2009, 2011), lo cual es muy común en elementos de tipo patrimonial. En este sentido es importante el desarrollo de metodologías y herramientas accesibles a profesionales y aficionados del patrimonio, que permitan realizar documentaciones de geometrías complejas de forma ágil y precisa.

A pesar de que muchos profesionales que actualmente trabajan en proyectos relacionados con la conservación del patrimonio cultural todavía siguen empleando las técnicas tradicionales, lo cierto es que en las últimas décadas la documentación geométrica mediante técnicas modernas de adquisición de datos 3D como el láser escáner terrestre (*TLS*) o la fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*) se ha utilizado ampliamente con grandes resultados (Santagati et al., 2013; Yilmaz et al., 2007). Ambas técnicas proporcionan modelos 3D fotorrealistas de alta resolución que permiten conocer con precisión la posición, la forma, la textura y el tamaño de cualquier elemento patrimonial en el espacio, en un momento dado en el tiempo; Algunos autores justifican incluso una revisión de los petroglifos ya documentados mediante los métodos tradicionales ya que los métodos modernos de documentación 3D, son capaces de detectar de modo objetivo un mayor número de grabados (Rodríguez Rellán et al., 2018).

En cuanto al patrimonio arquitectónico, el desarrollo de técnicas de documentación avanzadas como el *TLS* o la fotogrametría *SfM* adquiere

gran relevancia, permitiendo realizar una efectiva restauración en caso de destrucción parcial o total; el replicado del mismo; o un poder de análisis y estudio de mayor grado. Además, los edificios históricos no se ajustan a formas geométricas regulares, especialmente en fachadas significativas donde habitualmente se presentan esculturas, relieves y grabados en piedra, entre otros elementos con formas complejas donde las técnicas masivas de adquisición de datos métricos son imprescindibles (Barazzetti et al., 2011).

Las TIC y la documentación 3D

Por otro lado, el desarrollo de la realidad virtual y las TIC juegan actualmente un papel fundamental en la conservación patrimonial, ya que la difusión y la divulgación, para crear concienciación local e identidad territorial en base a este patrimonio, puede realizarse actualmente con medios visualmente atractivos (Caro & Hansen, 2015; Gaitatzes et al., 2001). Las TIC y los nuevos métodos de documentación 3D como la fotogrametría, ponen a disposición de aficionados, investigadores y profesionales, herramientas de un gran potencial para el estudio, difusión y divulgación patrimonial. Por ello, los avances metodológicos que se producen en esta dirección, además de contribuir a alcanzar los objetivos de identificación, protección y preservación fijados por la UNESCO, fomentan el cumplimiento de la *Estrategia para la Especialización Inteligente de Galicia* ([RIS3 subgrupo GT5](#)), la cual establece como uno de los retos prioritarios para esta comunidad, el desarrollo tecnológico en la puesta en valor del patrimonio cultural, tanto en la gestión de contenidos, como en su digitalización o catalogación.

3. INTRODUCCIÓN

“El patrimonio cultural es el conjunto de bienes tangibles, intangibles y naturales, considerados de interés relevante para la sociedad, que fueron heredados de generaciones pasadas y que deben ser conservados y transmitidos a las generaciones futuras” (Unesco, 1972). La necesidad de que perdure adecuadamente en el tiempo como nuestra herencia histórica es imprescindible, pero también como posible foco de atracción para la creciente demanda turística cultural (Bedate et al., 2004). Es por ello que se promueve el estudio, conservación y difusión del patrimonio como una fuente de riqueza cultural, pero también económica, generadora de identidad territorial y fomentadora del asentamiento poblacional que supone un caudal de recursos para las generaciones futuras.

3.1. Documentación geométrica del patrimonio

La documentación geométrica es una parte importante de la documentación general del patrimonio cultural y fue definida por la UNESCO (Unesco, 1972), como: *“La acción de adquirir, procesar, presentar y registrar los datos necesarios para la determinación de la posición, la forma y el tamaño de un monumento en el espacio 3D en un momento dado en el tiempo. La documentación geométrica registra el presente de los monumentos, como se han ido formando a lo largo del tiempo y es la base necesaria para el estudio de su pasado, así como el de su futuro”*. Dada la importancia de esta labor, es conveniente definir las necesidades documentales y particularidades físicas presentes en distintas tipologías patrimoniales y que condicionan la realización de esta tarea.

3.1.1. Patrimonio arquitectónico

La UNESCO (Unesco, 1972), define como patrimonio arquitectónico o inmueble, los monumentos, conjuntos de edificios o lugares, con un valor excepcional desde el punto de vista de la historia, el arte o la ciencia. Este organismo, establece que el término bienes inmuebles se refiere a una manifestación material, imposible de ser movida o trasladada. El patrimonio inmueble está constituido por monumentos, obras de la arquitectura y de la ingeniería, sitios históricos y centros industriales, zonas, calles, puentes, viaductos, etc. de interés o valor relevante desde el punto de vista arquitectónico. Dentro de esta tipología patrimonial, se incluyen no solo edificios históricos, sino también el patrimonio etnográfico, el cual, según la ley de patrimonio Histórico Español, son todas aquellas edificaciones e instalaciones cuyo modelo constitutivo es expresión de conocimientos adquiridos, arraigados y transmitidos consuetudinariamente y cuya factura se acomode, en su conjunto o parcialmente, a una clase, tipo o forma arquitectónicos utilizados tradicionalmente por las comunidades o grupos humanos, una tipología patrimonial muy común en Galicia.

Al igual que para otras tipologías patrimoniales, en el estudio del patrimonio arquitectónico es fundamental la topografía y los métodos de documentación geométrica (Böhler & Heinz, 1999). Arqueólogos, historiadores y conservadores necesitan a menudo documentar geométricamente los monumentos para su correcto estudio y conservación (Charalambos Ioannidis et al., 2000). También arquitectos, ingenieros y profesionales de la construcción (Carnevali et al., 2018; Kwak et al., 2013; Yang et al., 2016), necesitan planos de detalle para la correcta reparación, remodelación o mantenimiento de construcciones. El levantamiento métrico de edificios mediante técnicas tradicionales es tediosa y en ocasiones imprecisa. Estas técnicas implican la realización de mediciones individuales mediante instrumentos de medida como cinta métrica, flexómetro o distanciómetro láser y la transmisión de estas del elemento real al modelo teórico (Yilmaz et al., 2007). Otras técnicas más avanzadas como los métodos topográficos, requieren de instrumental y conocimientos específicos y no son del todo funcionales para geometrías patrimoniales complejas (Barazzetti et al., 2011).

3.1.2. Arte rupestre

En labores de documentación geométrica de patrimonio arqueológico, se presentan tareas que requieren metodologías específicas como la documentación de inscripciones en piedra o grabados rupestre. Para la documentación de estas manifestaciones culturales concretas, existen metodologías tradicionales específicas como el *Frotage* o el calco con plástico (Díaz-Andreu et al., 2006) y que han sido ampliamente utilizadas en los petroglifos gallegos. Estas técnicas, además de tediosas, son altamente agresivas con el soporte, al requerir no solo el contacto directo con el elemento, si no también interacción física con el mismo frotándolo, como en el caso de la técnica de *Frotage*, o pintando directamente sobre el grabado, como en la técnica del calco con plástico. Por ello, es conveniente caminar hacia la sustitución de estas técnicas de contacto por técnicas de documentación geométrica no invasivas como la fotogrametría o el láser escáner terrestre que permiten obtener modelos 3D del patrimonio sin contacto con el mismo (Bea & Angás, 2017; Díaz-Guardamino & D, 2013; Meijer, 2015; Ortiz-Sanz et al., 2010).

3.1.3. Los modelos 3D del patrimonio

Actualmente, las distintas técnicas tradicionales de documentación geométrica tanto en patrimonio arquitectónico como de arte rupestre, convergen hacia técnicas de adquisición de datos métricos masivas que permiten obtener modelos 3D como la tecnología Láser Escáner Terrestre (*TLS*), la luz estructurada o la fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*). La información obtenida mediante estas metodologías proporciona un registro métrico 3D que permiten la documentación y el análisis de formas, dimensiones y texturas del elemento a altas resoluciones, proporcionando una documentación mucho más completa, rigurosa y adecuada que la proporcionada por las técnicas tradicionales.

Por esta razón, las técnicas de modelado 3D y especialmente la fotogrametría *SfM* se han incorporado en las labores de documentación geométrica de todo tipo de patrimonio (Dai & Lu, 2010; Ordóñez et al., 2010). Dado que la inversión requerida para equipos fotográficos y *software* es sustancialmente menor que la requerida para el escáner 3D

y además es más adaptable a los lugares poco estables y con geometrías complejas. Además, hay situaciones en las que ni el *TLS* ni la utilización de técnicas tradicionales es viable, como en el caso de fachadas con zonas inaccesibles o incluso en edificios dañados o destruidos, donde los métodos involuntarios como la fotogrametría son la única posibilidad (Grün et al., 2004; Resco et al., 2014). Por estos motivos, la fotogrametría ha avanzado considerablemente en las últimas décadas y ha sido utilizada cada vez más no solo por arqueólogos (Bea & Angás, 2017; Gonizzi Barsanti et al., 2013), historiadores (Johnson & Solis, 2016) y conservadores (Martínez-Rodríguez et al., 2015; Juan Ortiz et al., 2013), sino también por ingenieros civiles (Bhatla et al., 2012; Kwak et al., 2013; Stavroulaki et al., 2016) o arquitectos (Sužiedelytė-Visockienė et al., 2015; Yang et al., 2016). No obstante, en el mercado sigue estando muy presente la tecnología láser escáner terrestre, probablemente debido a su alta tasa de adquisición de datos, su precisión relativa y la alta densidad de datos espaciales que proporciona (Ergun, 2010), además de unas necesidades de conocimientos metodológicos menos complejos que los que requiere la fotogrametría (J. H. Chandler & Buckley, 2016).

Cabe señalar que a pesar de que los métodos tradicionales de documentación geométrica acostumbran a tener una ejecución tediosa, estos son simples y con un alto grado de estandarización. Por el contrario, la aplicación de tecnologías modernas como *TLS* o la Fotogrametría *SfM*, requiere conocimientos específicos, una adaptación mayor a la escena u objeto de estudio, tienen un alto coste respecto a las técnicas tradicionales como el croquis, además de dificultar la integración con el resto de información 2D (Campana & Remondino, 2007). Es por ello que los métodos de modelado 3D modernos siguen más ligados a un perfil experto, por lo que los métodos tradicionales son ampliamente utilizados todavía por muchos profesionales en sus tareas cotidianas. Además gran parte del patrimonio arquitectónico se encuentra en los cascos históricos de pueblos y ciudades, donde la limitación de espacio, o las complejas geometrías son comunes las cuales dificultan en gran medida la aplicación de técnicas “sin contacto” como la fotogrametría o el *TLS*. Por estos motivos, es conveniente profundizar en la aplicación de estas

técnicas en casos de estudio donde encontramos habitualmente las mayores limitaciones en este sentido y caminar hacia flujos de trabajo ágiles y sencillos para profesionales y técnicos no especialistas en fotogrametría.

En lo referente a las documentaciones de arte rupestre, las técnicas como la fotogrametría *SfM*, además de proporcionar modelos 3D de alta resolución que aportan una información geométrica y radiométrica más completa y precisa de los grabados que los métodos específicos tradicionales, por su naturaleza no invasiva, siendo una técnica totalmente respetuosa con elementos frágiles como las estaciones de arte rupestre y por la capacidad de documentar elementos que los métodos tradicionales no consiguen detectar, suponen en este campo un avance todavía de mayor relevancia. No obstante, si bien los modelos 3D en sí mismos son especialmente útiles para estudios de arte rupestre, debido a la sinuosidad de algunos grabados, todavía es necesario utilizar algún método de realce para obtener una mejor visualización de los mismos. La bibliografía recoge varias posibilidades para conseguir el realce de grabados, como por ejemplo la generación de sombras relevantes basadas en la modificación de los puntos de iluminación virtuales sobre el modelo 3D, como se muestra en (Mudge et al., 2006). Otra posibilidad es la magnificación de los ejes perpendiculares del objeto (eje Z), como se describe en (Ortiz-Sanz et al., 2010). Otro método más avanzado denominado *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) (Díaz-Guardamino & D, 2013; Earl et al., 2010; Mudge et al., 2006, 2012), que se basa en un análisis del cambio del punto de iluminación en una colección de fotos del grabado, ha supuesto un avance importante en el análisis de arte rupestre. En los últimos años, otro flujo de trabajo originado en la comunidad de gráficos por computadora (Pires et al., 2015; Saito & Takahashi, 1990), denominado *Radiance Scaling*, basado en el análisis morfológico de los modelos 3D como se describe en (Vergne et al., 2010, 2018) y que es utilizado para la detección de grabados en (Carrero-Pazos et al., 2012; López-Menchero Bendicho et al., 2017; Medici & Rossi, 2015), ha demostrado un gran potencial para esta tarea. No obstante, conviene profundizar y tratar de estandarizar, simplificar y objetivar los

procedimientos y variables de configuración posibles en la aplicación de este realce.

3.2. Fotogrametría SfM

La fotogrametría de rango cercano se ha denominado históricamente a la técnica que permite obtener datos métricos de objetos mediante fotografías terrestres de los mismos (Albertz, J., Wiedemann, 1996; Brown, 1972; Clarke & Fryer, 1998). Es una metodología con una amplia trayectoria, que ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas en parte gracias al desarrollo de los algoritmos *Structure from Motion (SfM)* y los cuales propiciaron su expansión como método de documentación geométrica del patrimonio. A diferencia de la fotogrametría convencional y las primeras versiones del *software* de fotogrametría de corto alcance, que permiten la manipulación exclusiva de puntos seleccionados discretamente y, por lo tanto, de superficies simples, el *software* actual de fotogrametría *SfM* permite la documentación de superficies complejas mediante un proceso prácticamente automatizado en el que a partir de imágenes se generan nubes de puntos, mallas de triángulos y modelos 3D texturizados (Remondino & El-Hakim, 2006; Westoby et al., 2012).

Los orígenes de la fotogrametría *SfM* se encuentran en la comunidad de visión artificial. (Furukawa et al., 2010; Spetsakis & Aloimonos, 1991) y en el desarrollo de los algoritmos de identificación automática de puntos homólogos (Harris & Stephens, 1988; Otto & Chau, 1989). Cuatro factores destacan en la evolución de esta técnica. En primer lugar el desarrollo de los referidos algoritmos. El paso de procesado inicial en la fotogrametría *SfM* es la identificación de rasgos característicos en imágenes para determinar su correspondencia (Puntos homólogos). Mientras la fotogrametría convencional requiere su identificación manual, los algoritmos automáticos, como el algoritmo *Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)*, tal como se describe en (Chandran et al., 1997; Lowe, 2004), han permitido que la identificación de los puntos coincidentes en los pares estereoscópicos sea automática, lo que ha reducido significativamente el tiempo requerido para realizar esta tarea. El estado del arte en los algoritmos

de identificación automática de rasgos característicos de la imagen se describe en (Remondino et al., 2014).

En segundo lugar, la automatización del proceso de calibración mediante el cálculo inverso de los parámetros de orientación internos y externos de las cámaras. Tal como se describe en (Clarke & Fryer, 1998; Fraser, 2013), el *software* reconstruye la escena de acuerdo con los parámetros internos aproximados contenidos en los datos *EXIF* (*Exchangeable image file format*) de cada imagen, junto con los puntos homólogos obtenidos en el primer paso. El algoritmo de ajuste *Bundler*, que se describe en (Snavely et al., 2008; Triggs et al., 2000), se utiliza para estimar la posición de la cámara y extraer una primera nube de puntos de poca densidad (*sparse point cloud*) formada por los puntos homólogos detectados por el algoritmo *SIFT* (*Tie Points*). Por lo tanto, las orientaciones internas y externa y la geometría de la escena se reconstruyen simultáneamente en un solo proceso, sin la necesidad de una calibración previa de la cámara. Estas características permiten realizar estimaciones iniciales de las posiciones de la cámara y las coordenadas del objeto, que luego se refinan de forma iterativa utilizando la minimización no lineal de mínimos cuadrados.

En tercer lugar, utilizando las posiciones de cámara derivadas de *Bundler* como entrada, es posible obtener una nube de puntos de mayor densidad como salida (*dense point cloud*), implementando el algoritmo *Clustering view for Multiview Stereo* (*CMVS*) y *Patch-based Multiview Stereo* (*PMVS2*) (Furukawa et al., 2010; Furukawa & Ponce, 2010). *CMVS* descompone las imágenes de entrada solapadas en subconjuntos de tamaño manejable, y *PMVS2* se usa para reconstruir datos 3D de estos grupos individuales. La aparición de estos algoritmos nos ha permitido mediante un proceso automatizado, trabajar con superficies complejas (Barazzetti et al., 2011) y obtener nubes de puntos, mallas de triángulos y, posteriormente un modelo texturizado tridimensional completo (Westoby et al., 2012).

En cuarto lugar, unas mayores capacidades de computación, especialmente incrementadas debido a la aparición de la computación “en la nube” o *cloud computing* (Santagati & Inzerillo, 2013). Estos avances han facilitado que en sectores como la arqueología (Ortiz-Sanz

et al., 2010), la arquitectura (Roncella et al., 2012), la conservación y restauración (Guidi et al., 2004) o incluso en el mundo de la realidad virtual (Bellotti et al., 2011) se utilice ampliamente la fotogrametría en la última década. La fotogrametría *SfM* es capaz de obtener resultados próximos a los del *TLS* (Bayram et al., 2015; J. H. Chandler & Buckley, 2016), y su comparación en coste tan favorable, hace que esta sea una gran alternativa técnica para la adquisición de modelos 3D de alta resolución. Además, esta técnica parece mostrar un grado de adaptabilidad mayor a escenas complejas, como son los yacimientos de arte rupestre, ya que estos avances, también han propiciado que la fotogrametría *SfM* se muestre como una técnica flexible y adaptable a múltiples tareas de documentación geométrica. No obstante, dada la variabilidad metodológica que la fotogrametría *SfM* presenta, en especial en las tareas previas al procesado, conviene tratar de estandarizar los procedimientos que conlleva su aplicación.

3.3. Variabilidad metodológica de la ¡Error! Marcador no definido.

Para llevar a cabo un modelado mediante fotogrametría *SfM*, deben analizarse previamente los requisitos o condiciones técnicas del trabajo de documentación y que marcarán en gran medida el desarrollo del mismo, ya que la fotogrametría *SfM* presenta una gran variabilidad metodológica en este sentido. Por ejemplo, para la documentación geométrica de un área arqueológica extensa mediante fotogrametría, la obtención de información métrica de precisión es uno de los objetivos principales. Por otro lado, en trabajos de análisis de arte rupestre, la precisión geométrica pasa a un segundo plano, siendo la obtención de mallas de alta resolución para conseguir la detección del grabado el principal objetivo en ese caso. En otras ocasiones, las necesidades documentales no requieren obtener modelos 3D completos, sino simplemente una planimetría suficientemente precisa y detallada que es posible obtener mediante vectorización discreta a partir de los emparejamientos estereoscópicos, o para tomar medidas sobre la malla 3D, para el traslado de las mismas a un modelo teórico. Por ello, la fotogrametría siendo una técnica masiva de captura de datos puede

utilizarse también de forma discreta. En estos casos, es posible una optimización de la metodología de captura en campo ya que no necesariamente es un problema que los modelos 3D resultantes tengan huecos o ciertas imprecisiones. Esta variabilidad en los objetivos del trabajo, tiene una alta influencia en la técnica proporcionando a la fotogrametría una horquilla de costes y tiempos de ejecución que requiere estudiar detenidamente.

En la mayoría de trabajos realizados de documentación de patrimonio arquitectónico, arqueológico y especialmente de arte rupestre a nivel científico, así como las documentaciones geométricas de petroglifos realizadas en Galicia a nivel profesional hasta la fecha, se han utilizado habitualmente metodologías complejas que incluyen la utilización de pértigas, drones, o instrumental topográfico, lo cual resta a la técnica agilidad y sobretodo accesibilidad, de este modo, se pierden las principales ventajas con las que cuenta de partida frente a otras técnicas de modelado 3D. La accesibilidad de la fotogrametría *SfM*, en cuanto a su facilidad de aprendizaje, está ampliamente demostrada en artículos como (Gil-Docampo et al., 2019; Charalabos Ioannidis et al., 2016), donde se muestra que estas técnicas a niveles básicos son accesibles incluso a escolares. Para la obtención de datos métricos fiables, son necesarios unos conocimientos previos, pero estos se pueden adquirir con relativa facilidad y el *software* moderno de fotogrametría es de uso sencillo e intuitivo sobre todo para tareas rutinarias (Jim H. Chandler et al., 2007). Es por ello, que ante la necesidad de documentar un número elevado de elementos patrimoniales, es importante valorar los objetivos de dicha documentación, los productos y precisiones deseadas en ella y adaptar la metodología a las necesidades del trabajo, optimizando los tiempos de ejecución con metodologías sencillas y ágiles. Por lo tanto, es importante diferenciar los trabajos de documentación geométrica de patrimonio con el objetivo de obtener un resultado de alta calidad métrica y visual, habitualmente de un único elemento patrimonial, lo cual requiere del empleo de tiempo, esfuerzo y medios técnicos más avanzados, respecto de documentaciones patrimoniales menos exigentes, pero de un número de elementos masivo, como puede ser la documentación geométrica de ciudades históricas completas o

múltiples yacimientos de arte rupestre. Una vez determinado los objetivos del trabajo de documentación y en función de estos, cinco factores principales deben ser tenidos en cuenta para la planificación y ejecución de los trabajos según se detallan en los apartados siguientes.

3.3.1. Escala del trabajo y *Ground Sample Distance* (GSD)

En fotogrametría aérea, se denomina resolución geométrica, en adelante *Ground Sample Distance* (GSD), al tamaño de la porción de terreno que representa cada pixel en una fotografía. Este concepto, es trasladable a la fotogrametría de rango cercano y está relacionado directamente con la escala del trabajo. Mediante fotogrametría de rango cercano, es posible documentar desde áreas arqueológicas extensas a objetos de pequeño tamaño. Incluso, en la documentación de un mismo elemento patrimonial, es posible utilizar distintas escalas de trabajo por zonas, en función de si se desea obtener mayor o menor resolución geométrica en cada una de ellas. Es por ello que previamente a la planificación de las tareas, es importante determinar el GSD máximo exigido o GSD de trabajo.

Independientemente de la metodología empleada, la escala del producto o resultado deseado en un trabajo de documentación geométrica, y el límite de percepción visual determinan la tolerancia del error métrico de dicho trabajo. Por otro lado, en trabajos de fotogrametría *SfM* la determinación de las coordenadas 3D de cada punto presenta mayor ambigüedad en la componente de profundidad que en las componentes planimétricas. Siendo el error esperado en planimetría igual al GSD de trabajo y de entre el doble y el triple en la componente de profundidad (Peppas et al., 2016; Sanz-Ablanedo et al., 2018). Por ello, para cumplir los requisitos de precisión métrica, la planificación de la toma se debe realizar considerando la obtención de un GSD entre la mitad y un tercio de la tolerancia de error en el mismo. No obstante en trabajos de fotogrametría de rango cercano sobre elementos con geometrías complejas, la disposición de imágenes puede adoptar distintas distancias objeto, por lo que cabe valorar cómo afecta esto a la calidad geométrica y visual de los resultados.

3.3.2. El sensor, la cámara fotográfica

Una vez establecido el *GSD* de trabajo, es momento de determinar el tipo y componentes del sensor o cámara fotográfica a emplear. La fotogrametría *SfM* permite gran variabilidad en este aspecto, pudiendo emplearse desde cámaras de gran calidad, a cámaras de bajo coste, incluso la integrada en dispositivos *SmartPhone*. La bibliografía de la fotogrametría convencional recoge tres tipologías de cámaras: métricas, no métricas y semimétricas (Lerma-García, 2002). Las cámaras métricas o semimétricas se caracterizan por contar con parámetros internos conocidos permitiendo reconstruir la geometría de la escena a partir de las marcas fiduciales. Las cámaras no métricas (cámaras convencionales) se caracterizan por tener una geometría interna desconocida, por lo que es imprescindible previamente la determinación de los parámetros de orientación internos para extraer información métrica a partir de sus imágenes (Duane, 1971; Lerma-García, 2002). A pesar de que la geometría interna de las cámaras comerciales convencionales no métricas es generalmente inestable, sobre todo de las lentes (Wackrow & Chandler, 2008), existen desde hace décadas procesos de calibración interna, en los que se evalúan parámetros como la distancia focal, distorsión radial y tangencial de la lente (Duane, 1971), posición del centro óptico (Roelofs, 1950) o el tamaño del CCD (Clarke & Fryer, 1998; Shortis et al., 1995), entre otros, permitiendo su utilización en fotogrametría.

No obstante, gracias a los avances de la fotogrametría *SfM*, y concretamente la automatización del proceso de calibración mediante el cálculo inverso de los parámetros de orientación internos (Clarke & Fryer, 1998; Fraser, 2013), actualmente es posible realizar las orientaciones de la cámara en base a las imágenes del propio objeto sin la necesidad de una calibración previa de la misma. La fotogrametría *SfM*, permite además la calibración inversa de prácticamente cualquier tipo y modelo de cámara, incluso con objetivos ojo de pez, los cuales presentan una gran distorsión, es posible llevar a cabo trabajos fotogramétricos con garantías (Beekmans et al., 2016). Por este motivo, y aunque la elección del sensor fotográfico sigue teniendo gran influencia en los resultados, los algoritmos de calibración inversa

permitiendo calibraciones internas de calidad de casi cualquier cámara, hacen que esta variable sea cada vez menos importante.

En cuanto a las características de la cámara fotográfica, cabe prestar especial atención en el tamaño y resolución del sensor así como en el tamaño de la focal y calidad de la lente. En este sentido, se recomienda el empleo de objetivos de focal fija con una distancia focal comprendida entre el ancho y el largo del sensor, el cual debe contar con una relación entre tamaño y resolución compensado (Mosbrucker et al., 2017). En cualquier caso, cabe valorar el grado de influencia que tiene la elección de la cámara e incluso valorar la posibilidad de utilización de dispositivos *SmartPhone* en las tareas de documentación geométrica básicas.

3.3.3. La red fotogramétrica

La precisión en trabajos de fotogrametría *SfM* actualmente no depende tanto de la calidad del sistema fotográfico si no de una correcta planificación y ejecución de la toma, ya que la disposición fotográfica, o lo que es lo mismo, el diseño de la red fotogramétrica, es uno de los factores que afectan a la calidad métrica de los resultados en mayor medida (Remondino & El-Hakim, 2006). Por ello, una vez fijadas las variables de resolución espacial (*GSD*) deseada y conocidas las características de la cámara a utilizar, conviene planificar la toma fotográfica para conseguir una red fotogramétrica robusta, formada por fotos con orientaciones adecuadas para poder proporcionar modelos 3D con calidad métrica en todas las zonas del objeto. Además de en la calidad geométrica, la disposición de tomas fotográficas también influye en la calidad visual o radiométrica del modelo. En este sentido, dejando zonas sin documentar fotográficamente o con perspectiva oblicua lo que produce un fenómeno de estiramiento de la textura (Santiago Martínez et al., 2013); o debido a los elementos que ocultan parte del objeto al estar situados entre la cámara y este, provocando una doble proyección (Al-kheder et al., 2009), incluso debido a las diferencias de exposición o balanceado de colores en la toma fotográfica, incluso la presencia de reflejos o brillos sobre el objeto durante el fotografiado (Trinchão Andrade et al., 2012); son factores

que producen errores radiométricos en el mapeado de texturas (Apollonio et al., 2012), no obstante, si el contraste no es excesivo, el *software* actual es capaz de corregir en gran medida estos defectos mediante técnicas de balance de color aplicadas sobre cada imagen.

Por lo tanto, entre los factores que se deben tener en cuenta para el diseño de la red fotogramétrica, y que influyen en la calidad métrica y visual de los resultados, se encuentran la distancian entre la cámara fotográfica y el objeto, la disposición angular de la toma con respecto a la superficie del mismo, el solape y orden de toma de las imágenes, las limitaciones espaciales en el entorno del elemento, o la cobertura de todas las superficies del mismo con suficientes fotografías. Numerosos estudios y manuales de desarrolladores de *software* fotogramétrico, proporcionan indicaciones estandarizadas de las distribuciones espaciales de la toma fotográfica para la implementación de fotogrametría *SfM*. Sin embargo, es común encontrar elementos patrimoniales con geometrías complejas, donde estas indicaciones metodológicas no son fácilmente aplicables y requieren una adaptación mayor. Los mejores resultados (malla de triángulos sin agujeros, con densidad uniforme y textura realista) se obtienen preferentemente con imágenes tomadas con el eje de la cámara perpendicular a la superficie del objeto, lo que requiere tomar estereopares para cada plano a modelar, lo cual es tedioso o inviable en elementos de geometrías complejas. Por otro lado, analíticamente la toma convergente u oblicua, obtiene resultados más precisos que la toma perpendicular, requiere menos imágenes para obtener la misma cobertura estereográfica, y tiene una mayor confiabilidad interna (Mason, 1994). Cabe analizar cómo se comportan los motores de procesamiento de fotogrametría *SfM* modernos, y si pueden conseguir la correcta orientación externa de combinaciones de fotos perpendiculares y oblicuas lo que permitiría una gran adaptación a cualquier zona de estudio.

En cuanto a los parámetros fotográficos como la velocidad de obturación, la sensibilidad y la apertura de diafragma, estarán condicionados en gran medida por la cantidad de luz que entre en el sistema fotográfico, la cual incluso será variable dependiendo de la situación y ángulo de cada punto de toma. La elección de unos parámetros fotográficos apropiados tendrá por lo tanto también

influencia en la calidad visual como geométrica de los resultados. En este sentido, se recomienda la utilización de sensibilidades *ISO* bajas, velocidades de obturación tan altas como la estabilidad de la toma permita sin provocar “trepidación” (Peres, 2013) y aperturas de diafragma preferentemente pequeñas sin alejarse en exceso del punto dulce del objetivo donde la lente ofrece mayor nitidez (Hollows & Singer, 2009).

Por otro lado, especialmente para trabajos de patrimonio arquitectónico, la altura del elemento a modelar, suele ser uno de los aspectos más restrictivos ya que puede implicar la utilización de sistemas de elevación de la toma. Con estos se consiguen obtener fotografías desde perspectivas superiores que fortalecen geométricamente la red fotogramétrica y además, permiten capturar elementos no visibles correctamente desde las fotografías a nivel de suelo, no obstante son medios que hacen más compleja la toma restando agilidad y accesibilidad a la técnica. En cuanto al empleo de dispositivos de estabilización como trípodes, que permiten la realización de largas exposiciones para la obtención de imágenes de gran nitidez, es otro factor que puede afectar a los resultados finales favorablemente, pero prolongar los tiempos de ejecución en campo, por lo que su utilización, al igual que los dispositivos de elevación, conviene valorarla en función de los requisitos del trabajo.

3.3.4. El sistema de orientación y escalado de la escena

Otro aspecto a tener en cuenta, con gran influencia en los tiempos y costes de ejecución de un trabajo fotogramétrico, es el método empleado en el establecimiento de la red de puntos de apoyo o medidas de referencia. Los puntos de apoyo, son puntos de coordenadas conocidas, identificables en las imágenes y que cumplen una doble función en el ajuste fotogramétrico, por un lado escalar y orientar el modelo 3D en el espacio, bien sea en coordenadas relativas o absolutas, y por otro lado, mejorar el propio ajuste fotogramétrico teniendo influencia tanto en los parámetros de orientación interna de las cámaras como en los de orientación externa. El establecimiento de una red de puntos de apoyo suele ir ligada al empleo de instrumental topográfico,

lo que reduce considerablemente la agilidad de ejecución de la técnica. Por otro lado, el empleo de medidas de referencia permite escalar y orientar el modelo ágilmente con una precisión nada despreciable como se muestra en estudios previos (Remondino & El-Hakim, 2006). Además en ocasiones, como en estudios de arte rupestre o inscripciones donde los objetivos del trabajo son la detección y análisis de los grabados, la calidad métrica del modelo pasa a un segundo plano, permitiendo la utilización de una metodología de toma de datos en campo realmente ágil, por lo que conviene valorar qué método de orientación y escalado se debe utilizar.

3.3.5. Las variables y configuraciones del procesado *SfM*

Por último, la elección del motor de procesado tendrá también influencia en la calidad de los resultados, rendimiento y accesibilidad de la técnica. La popularización de la fotogrametría *SfM*, se ha producido especialmente a raíz de su utilización por una gama de motores de procesado “en la nube” entre los que destacan *Photosynth* (Microsoft Corporation, EE. UU.) (Snavely et al., 2008), *123D Catch* (Autodesk Inc., USA) (Lavy et al., 2015), *ARC3D* (Ku Leuven, Belgium) (Tingdahl & Van Gool, 2011), o *Recap Photo* (Autodesk Inc., USA) (Eulitz & Reiss, 2015; Greif et al., 2017) los cuales han permitido la expansión del uso de la fotogrametría *SfM* de un modo básico al público en general. Posteriormente, en el *software* profesional de fotogrametría, se implementan los algoritmos *SfM*, surgiendo soluciones de *software* de procesado local como *Photomodeler Scanner* (Eos Systems Inc, Canada) (Alby et al., 2009), *Pix4D* (EPFL, Switzerland) (Turner et al., 2014) o el antiguo *PhotoScan* (Agisoft LLC., Rusia) (De Reu et al., 2013a) actualmente llamado *MetaShape*, entre otros.

Los procesados *SfM* tienen un alto grado de automatización, pero el operario todavía puede influir en gran medida en la calidad de los resultados. En este sentido, el *software desktop* profesional permite configurar un número mayor de parámetros pero requiere de conocimientos de manejo específicos. En las opciones de computación “en la nube”, más enfocadas a aficionados o profesionales no expertos

en fotogrametría, prácticamente no es posible configurar ningún parámetro del procesado excepto el grado de calidad o profundidad del mismo. Las variables de configuración del procesado fotogramétrico que influyen en los resultados son numerosas, no obstante el parámetro denominado “calidad” es el más relevante y está presente tanto en *software cloud computing* como en distintas fases del procesado en *software desktop*. Por ello, es el principal parámetro de influencia en la calidad de los resultados en cuanto al método de procesado. Este parámetro hace referencia a un tipo de representación de imágenes a múltiples escalas desarrollada por las comunidades de visión por computadora denominado “imágenes piramidales”, que permite que el *software* trabaje con reducciones de la resolución de la imagen original de cara a agilizar el procesado. La necesidad de agilizar el procesado se debe a que este requiere de altas capacidades de computación, por lo que la elección del parámetro “calidad” tiene gran influencia en los tiempos de ejecución y consecuentemente en los costes del trabajo. En este sentido, las opciones de computación “en la nube” pueden ser interesantes para agilizar documentaciones de elementos masivos, ya que no requieren conocimientos específicos de manejo ni grandes inversiones en *hardware* y *software*.

3.4. Evaluación de las variables metodológicas de la fotogrametría

Para evaluar cómo influyen las distintas variables metodológicas de un proceso fotogramétrico en la calidad geométrica y visual de los resultados del mismo, así como en el rendimiento y accesibilidad de la técnica, es necesario diseñar experimentos que permitan aislar y analizar su comportamiento. En este sentido, los más habituales son aquellos trabajos que comparan técnicas que difieren en la cámara fotográfica empleada (J.H. Chandler et al., 2005; Chiabrando et al., 2011; J Ortiz et al., 2005); en el número y distribución de puntos de control (Deng & Faig, 2001; Karras et al., 1999; Sanz-Ablanedo et al., 2018); en el número de fotografías realizadas (Jim H Chandler et al., 2003; Stojic et al., 1998); en la técnica de calibración empleada (Jim H Chandler et al., 2003; Pappa et al., 2001; Schneider et al., 2009); o en

el *software* utilizado (Barazzetti et al., 2011). Una vez diseñado el experimento, y establecido el aislamiento de las variables, para su evaluación en términos de calidad geométrica, calidad visual, rendimiento y accesibilidad de la técnica, para su evaluación la bibliografía recoge distintos indicadores que se detallan a continuación.

3.4.1. Indicadores de calidad geométrica

Para la evaluación de la calidad geométrica de los resultados obtenidos mediante fotogrametría terrestre, actualmente en la bibliografía no hay definido un procedimiento estándar, tal y como si existe en fotogrametría aérea (*ISO 19115-2:2009*) (Di et al., 2013). No obstante, en la mayoría de estudios previos se emplea un sistema basado en el cálculo de la calidad de medida (*MQ, metric quality*), en base a la comparación de puntos de contraste reales (*True Check Points, TCPs*) y la obtención de puntos de contraste fotogramétricos (*Photogrammetric Check Points, PCPs*) (Bolognesi et al., 2015; Martínez-Rodríguez et al., 2015; Uysal et al., 2015). Para ello en primer lugar es necesario la medición de los *TCPs* mediante una técnica más precisa que la técnica fotogramétrica evaluada. A pesar de que hay trabajos que emplean tecnología específica (Abd Elbasit et al., 2009; Jiang & Jauregui, 2007), en la mayor parte de los casos se utiliza la estación total (Arias et al., 2006; Barazzetti et al., 2011; Desmond & Bryan, 2003; Fujii et al., 2009; Kvamme et al., 2006); un calibre (Ortiz-Sanz et al., 2010), un flexómetro (Martínez-Rodríguez et al., 2013) o un láser escáner terrestre (Sturzenegger & Stead, 2009).

A continuación, se extraen las características métricas de los *PCPs* a partir del modelo 3D fotogramétrico. Es importante incidir en la diferenciación entre los puntos de apoyo terrestre (*GCPs*) y los *PCPs* (Jim H Chandler et al., 2003). Los primeros intervienen en el ajuste fotogramétrico mejorando la calibración de los parámetros internos y externos de las cámaras, y por lo tanto, como parte del proceso, no deben formar parte de la evaluación de los resultados; los segundos, se definen con posterioridad al ajuste fotogramétrico y por lo tanto permiten que el control de calidad geométrica sea independiente al mismo. Para su establecimiento, principalmente se utilizan dos

métodos: el marcado de los mismos directamente sobre las imágenes del trabajo, lo cual proporciona un análisis de la calidad geométrica de la restitución discreta sobre los emparejamientos estereoscópicos; o el marcado de los puntos directamente sobre el modelo 3D texturizado que proporciona un análisis real de la calidad geométrica de este. Es posible evaluar también la calidad geométrica de otros entregables, como las ortoimágenes o los Modelos Digitales de Elevación (MDE), a través del marcado directo de *PCPs* para el control planimétrico, en el caso de las ortofotos, o para el control altimétrico o de profundidad sobre los modelos de elevación.

Finalmente, para obtener una expresión numérica que proporcione un valor de la *MQ* de las variables fotogramétricas evaluadas, es necesario seguir un procedimiento estadístico de comparación de las diferencias observadas en dos parámetros de contraste (errores en la estimación de coordenados y/o en la estimación de la distancias) entre los *TCPs* y los *PCPs*.

La evaluación del error en la estimación de coordenadas se realiza mediante la comparación directa de las coordenadas de los *PCPs* y los *TCPs*. Para ello es necesario que ambos tengan el mismo sistema espacial de coordenadas. De esta forma se obtiene el error en cada una de las componentes, siendo el error total la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de los errores anteriores.

Para la evaluación de los errores entre *TCPs* y *PCPs* mediante la medición de distancias se comparan las distancias medidas entre los *TCPs* tomados dos a dos, con las mismas distancias entre los *PCPs* (Jiang & Jauregui, 2007). A diferencia del análisis en base a las coordenadas, en este caso no es necesario que exista un sistema de coordenadas común siendo el único requisito que el modelo se encuentre escalado.

Los indicadores anteriores nos proporcionan la *MQ* de los puntos individuales empleados para el control de calidad geométrica, no obstante es necesario obtener un valor final representativo e indicativo de la calidad global del método fotogramétrico, por lo que conviene realizar un tratamiento estadístico de todos los puntos comparados. La media aritmética, muestra el valor central de los datos observados,

siendo la que más se utiliza tanto para estimar el error entre distancias (Guidi et al., 2003) como en coordenadas (Aguilar et al., 2005); Algunos autores recurren a la media del error (Jiang & Jauregui, 2007; Lejot et al., 2007) o a la media del valor absoluto del error (Barazzetti et al., 2011). Otros índices empleados son, el MSE, que calcula la media aritmética de los cuadrados de los errores (J Ortiz et al., 2005) y el RMSE, una medida de la diferencia entre los valores pronosticados por un modelo o un estimador y los valores observados de la realidad (Abd Elbasit et al., 2009; Aguilar et al., 2005; Arias et al., 2007; Yilmaz et al., 2007).

Por otro lado, para la estimación de la precisión se recurre a la desviación estándar o desviación típica. Es una medida de dispersión que nos indica cuánto tienden a alejarse los valores individuales del valor promedio. La desviación estándar se emplea como estimador de la MQ tanto en el caso de comparación de distancias como de coordenadas (Aguilar et al., 2005; Jim H Chandler et al., 2003; Chiabrando et al., 2011; González-Aguilera et al., 2009; Wackrow & Chandler, 2008). Finalmente, cabe señalar que es importante proporcionar la estimación del error de modo relativo al tamaño del objeto referenciando este a la diagonal principal del mismo.

3.4.2. Indicadores de calidad visual

La calidad visual de un modelo fotogramétrico, en primera instancia está ligada a la resolución geométrica (GSD) con la que se hayan obtenido la colección de imágenes para la generación del mismo. Este parámetro marca la resolución máxima posible para obtener la textura del modelo 3D sin el remuestreo de la información de las fotografías.

Por otro lado, para evaluar la calidad visual del modelo, será necesario también estudiar la presencia de errores en la textura en zonas sin documentar fotográficamente o con deformaciones. En estas, habitualmente se produce un fenómeno de estiramiento de la textura (Juan Ortiz et al., 2013), en un intento del *software* por completar esa parte carente de información. En otras ocasiones se produce una doble proyección originada cuando la textura se aplica dos veces, una

primera sobre la parte correcta del elemento, y otra sobre la zona oculta, es decir, los píxeles del elemento situado delante se proyectan sobre el que se encuentra detrás según la perspectiva de la foto (Al-kheder et al., 2009). Otro aspecto a considerar en la evaluación de la calidad visual del modelo, es la presencia de diferencias radiométricas en el mapeado de texturas (Apollonio et al., 2012), las cuales repercuten en la calidad estética y en el realismo del modelo 3D, aunque su posición sobre la malla poligonal sea correcta. Estas se deben a las variables condiciones de iluminación que se van sucediendo durante el proceso de fotografiado y que ofrecen como resultado desigualdades de color entre los diferentes parches de textura extraídos de las fotografías seleccionadas por el *software*. Si el contraste no es excesivo, el *software* actual es capaz de corregir este defecto mediante técnicas de balance de color aplicadas sobre cada imagen. En (Trinchão Andrade et al., 2012) se recogen también errores en el color por la presencia de reflejos o brillos sobre el objeto durante el fotografiado.

3.4.3. Indicadores de rendimiento y accesibilidad

Los principales indicadores de rendimiento y accesibilidad se definen a continuación de modo independiente para tiempos y costes, facilidad de aprendizaje y cobertura de necesidades en documentaciones de patrimonio arquitectónico y arte rupestre.

3.4.3.1 Tiempos y costes

Para la evaluación del rendimiento de una técnica deben considerarse principalmente los tiempos y costes que conlleva su ejecución, estos deben ser medidos individualmente para cada fase del proceso diferenciando entre el trabajo de campo y de oficina.

Para la evaluación de los tiempos de trabajo de campo, la toma fotográfica y el establecimiento de la red de *GCPs* son las principales tareas a considerar. Cabe señalar que los tiempos empleados para el establecimiento de la red de *TCPs*, no deben ser considerados en la evaluación ya que no son indispensables para la ejecución de la técnica,

y solo se ejecutarían en campo si se desea obtener un control de calidad geométrica independiente al procesado.

En cuanto al trabajo de oficina, deben considerarse los tiempos de procesado y post procesado de los modelos 3D. En este aspecto, cabe diferenciar entre el trabajo que requiere la interacción del usuario y los tiempos de computación informática automatizada en los que la presencia del técnico no es necesaria.

Para la evaluación de los costes de ejecución de la distintas variables metodológicas, deben considerarse tanto los costes de equipamiento de campo como de los equipos informáticos y licencias de *software* necesarias para el procesado y desarrollo completo de las tareas.

3.4.3.2 Adaptabilidad a zonas complejas

Las metodologías de adquisición de datos 3D como la fotogrametría *SfM* o el *TLS*, por su naturaleza masiva, son técnicas con una gran adaptabilidad en cuanto al objeto de estudio, ya que permiten la obtención de datos métricos y radiométricos de alta resolución de casi cualquier elemento. No obstante, más allá de la adaptabilidad al objeto de estudio, es importante analizar la adaptabilidad de ambas técnica a las necesidades y limitaciones presentes en distintos escenarios de trabajo.

Para ello, es necesario testear la calidad de sus resultados en escenarios de distinta complejidad, ya que si bien es importante evaluar cómo se comporta la técnica en escenarios tipo o estándar, es también importante evaluar el rendimiento en escenarios complejos o extremos, los cuales son habituales en estudios de patrimonio arquitectónico y arqueológico. Es importante también analizar las necesidades y limitaciones que en dichos escenarios presenta la técnica para la ejecución de la toma de datos, en especial aquellas metodologías que requieren el uso de trípodes como en caso del *TLS* o en ocasiones la fotogrametría, y que por lo tanto requieren de lugares relativamente amplios y estables para su correcto desarrollo.

Por último, el indicador cuantitativo principal a considerar para la evaluación de la adaptabilidad de la técnica a distintos escenarios es el peso de los equipos, siendo un indicador importante si los trabajos son en zonas forestales o de difícil acceso, lo cual es habitual en estudios de patrimonio arqueológico.

3.4.3.3 Facilidad de aprendizaje

Para estudiar la accesibilidad de una técnica en cuanto a su facilidad de aprendizaje y ejecución, es conveniente someter su utilización a distintos perfiles de usuario. Se considerará una técnica con facilidad de implementación aquella que sea fácilmente asimilable y ejecutable por perfiles no técnicos como escolares, aficionados al patrimonio o profesionales no especializados en metrología como arqueólogos, historiadores o conservadores (Gil Docampo et al., 2019; Charalabos Ioannidis et al., 2016).

3.4.3.4 Cobertura de necesidades en estudios de arte rupestre

Además de las necesidades métricas y visuales en la obtención de los modelos 3D para documentación patrimonial, cabe analizar la cobertura de necesidades en lo referente a los estudios de detección y análisis de arte rupestre, debido a que la calidad geométrica y visual del modelo 3D pasa a un segundo plano en estos casos. En estudios de arte rupestre, el entregable final son los calcos vectoriales del grabado, los cuales son comparables directamente a los obtenidos con otras metodologías sobre la misma muestra de estudio, todo ello con el objetivo de analizar el mayor o menor potencial en la detección y discriminación de grabados antrópicos de la metodología empleada (Carrero-Pazos et al., 2012, 2018), independientemente de la calidad geométrica y visual del modelo 3D. Por otro lado, el arte rupestre gallego integra distintas tipologías en el diseño de los grabados (Cuevillas, 1951; Varela, 1982), por lo que el análisis debe realizarse sobre una muestra representativa del fenómeno.

3.4.3.5 Cobertura de necesidades en estudios de patrimonio arquitectónico

En ocasiones las necesidades de documentar el patrimonio arquitectónico no tienen como objetivo obtener modelos 3D ni ortofotos de alzados, habitualmente en su lugar se demandan planos vectoriales y por lo tanto, aunque la textura del modelo o la ortofoto presente errores, estos no necesariamente impiden obtener de forma correcta dichas vectorizaciones. Es por ello que cabe analizar la cobertura de necesidades de la técnica, no solo en la obtención de modelos 3D de alta calidad geométrica y visual, sino también en este sentido.





4. OBJETIVOS

Dada la variabilidad metodológica que presenta actualmente la fotogrametría *SfM*, el objetivo principal de esta tesis es evaluar diferentes metodologías fotogramétricas *SfM* de bajo coste para la documentación geométrica del patrimonio arquitectónico y arqueológico, analizando los resultados obtenidos fundamentalmente en términos de calidad geométrica, calidad visual, rendimiento y accesibilidad de la técnica. Para lograr este objetivo general es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Con el objetivo de analizar la calidad geométrica y visual, el rendimiento y la accesibilidad de la fotogrametría *SfM* para el levantamiento de fachadas de centros históricos de ciudades, se efectúa el modelado de varias tipologías arquitectónicas en el casco histórico de Santiago de Compostela, proponiendo una estandarización metodológica en lo referente al establecimiento de una correcta red fotogramétrica con dos enfoques principales: la búsqueda de un alto rendimiento y accesibilidad de la técnica mediante un flujo de trabajo muy simple en los casos de estudio “estándar” donde la aplicación de la fotogrametría *SfM* es sencilla; y la búsqueda de una metodología que permita el levantamiento de fachadas consideradas casos complejos donde las limitaciones geométricas de la escena son “extremas” o más dificultosas para el empleo de la técnica, como una calle estrecha o una fachada con soportales. Estos objetivos se consiguen en el primer capítulo de esta tesis.

2. Con el objetivo de evaluar las variables de *software* de procesado fotogramétrico para documentaciones de patrimonio arquitectónico, se realiza la comparación de resultados entre dos opciones de *software* fotogramétrico profesional de computación local como son *PhotoScan* y *Pix4D*, con *software* fotogramétrico de uso gratuito para fines sin ánimo de lucro como es *Recap Photo*. La comparación es realizada sobre dos colecciones de imágenes comunes correspondientes al Monasterio de *San Martín Pinario* y a la fachada oeste de *Praza da Inmaculada*, ambos casos en el casco histórico de Santiago de Compostela. La metodología, resultados y conclusiones del estudio se recogen en el segundo capítulo de esta tesis.

3. Con el objetivo de evaluar la calidad geométrica, calidad visual, rendimiento y accesibilidad de la fotogrametría *SfM* en la documentación geométrica de petroglifos de geometrías complejas, se ha realizado el modelado del petroglifo de *O Castriño de Conxo* en Santiago de Compostela, mediante un flujo de trabajo simple, optimizado y con *software* gratuito y sus resultados se comparan con los obtenidos mediante tecnología *TLS* de última generación. La misma metodología fotogramétrica es aplicada en otros casos de arte rupestre galaico-portugués con el objetivo de evaluar la técnica en una muestra representativa de este fenómeno cultural. Además, con el objetivo de analizar la cobertura de necesidades para la documentación de arte rupestre, se testea el método de realce de modelos 3D basado en el renderizado *Radiance Scaling*, comparando sus resultados con documentaciones previas realizadas con métodos convencionales. La metodología, resultados obtenidos y conclusiones del estudio se recogen en el tercer capítulo de esta tesis.

4. Por último, con el objetivo de evaluar la facilidad de aprendizaje y cobertura de necesidades de la metodología desarrollada en el capítulo anterior en la documentación vectorial de grabados rupestres, se ha realizado un estudio en el que se evalúa el trabajo colaborativo en el que participaron miembros de la asociación de amantes del arte rupestre “*Colectivo A Rula*” (Santiago de Compostela), quienes tras una breve sesión de formación de 3 horas, realizaron la toma de imágenes en

campo de varias muestras de arte rupestre, en algunos casos inéditas, para un modelado 3D mediante *software cloud computing* de uso gratuito. Además, con el objetivo de estandarizar y objetivar una metodología simple y un flujo de trabajo completo para el análisis de arte rupestre, se testean distintas opciones de configuración de renderizados de realce y vectorización automática sobre los casos de estudio documentados. Estos objetivos se consiguen en el cuarto capítulo de esta tesis.





5. CAPITULO I

MODELADO 3D DE FACHADAS HISTÓRICAS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA *SfM*. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE DISTINTAS TIPOLOGÍAS ARQUITECTÓNICAS DE UN CASCO HISTÓRICO.

RESUMEN

Uno de los principales factores que afectan a la calidad de los resultados en la aplicación de técnicas fotogramétricas para el modelado 3D de elementos patrimoniales, es la limitación de espacio en la escena de trabajo. Numerosos estudios muestran la confiabilidad de la fotogrametría *Structure from Motion (SfM)* cuando el objeto está ubicado en un espacio grande y accesible; sin embargo, al aplicar esta técnica a un caso particular, la toma fotográfica debe adaptarse a las particularidades de cada ubicación. Este artículo presenta la documentación fotogramétrica de fachadas urbanas de diferentes tipologías en cascos históricos, centrándose en el establecimiento de una red fotogramétrica que permita resolver las particularidades geométricas de cada caso. El centro histórico de Santiago de Compostela (España) ha sido elegido para este estudio. Se seleccionaron cuatro casos representativos de diferentes tipologías urbanas: “fachada significativa”, “fachada en una calle estándar”, “calle

estrecha” (relación entre ancho de calle y alto de fachada menor que $1/3$) y “fachada con soportales”. Todos se han resuelto satisfactoriamente, obteniéndose errores relativos entre $1/770$ y $1/1040$.



5.1. Introducción

La necesidad de preservar los centros históricos se deriva principalmente de su papel como elemento integrante del patrimonio cultural y como recurso para el sector turístico-cultural (Chang et al., 1996; Steinberg, 1996). Su documentación es esencial para abordar adecuadamente su protección efectiva. Una parte importante de la documentación de construcciones históricas es la adquisición de datos geométricos. El uso de técnicas de adquisición de datos de ingeniería, como el escáner láser terrestre, en el proceso de documentación del patrimonio cultural se ha realizado ampliamente en la última década con excelentes resultados (Arayici, 2007; Brumana et al., 2014). Este método proporciona mayor precisión que los métodos tradicionales, acelera significativamente el proceso y proporciona modelos tridimensionales completos y de alta calidad. El modelado tridimensional puede ser una herramienta de gran potencial en la identificación, seguimiento, conservación y restauración de todo tipo de patrimonio arquitectónico (Lerones et al., 2010). La utilidad de los modelos 3D, por ejemplo en el caso de un elemento del patrimonio perdido o dañado, para utilizarlo en exposiciones virtuales o para fines educativos se ha demostrado en muchas ocasiones, resultando en una expansión en el uso de esta nueva tecnología para la documentación del patrimonio por parte de diferentes técnicos (Martínez et al., 2012). Paralelamente a la expansión del escaneo láser terrestre, causada por la creciente demanda de modelos 3D, la fotogrametría digital, especialmente la fotogrametría de corto alcance, se ha beneficiado de avances significativos y una creciente popularidad en sectores como la arqueología (De Reu et al., 2013 and Yilmaz et al., 2008), la arquitectura (Guarnieri et al., 2013 y Kang et al., 2010), el urbanismo (Stojakovic and Tepavcevic, 2011), la restauración y conservación (Martínez et al., 2013), e incluso en el mundo de la realidad virtual (Bellotti et al., 2011). Esto se debe principalmente a que la inversión requerida para el modelado en 3D por fotogrametría es significativamente menor que la de la adquisición de un escáner láser terrestre, y proporciona una adaptación más operativa a las necesidades de estos grupos (Sanz et al., 2010).

La fotogrametría digital convencional de corto alcance es una técnica que se ha utilizado durante muchos años. Desde su aparición, se ha convertido en una herramienta poderosa y ampliamente utilizada para el modelado tridimensional (Remondino and El-Hakim, 2006, and Fraser and Cronk, 2009). El desarrollo de la aerotriangulación y los algoritmos de extracción de información 3D a partir de imágenes, han mejorado radicalmente la calidad de los datos 3D obtenidos con estas técnicas (Chandler, 1999 and Lane et al., 2000). Del mismo modo, las mejoras en el coste y la calidad de las cámaras *réflex* compactas y de lente única (*Single lens réflex*, *SLR*) y los métodos para la calibración de dichas cámaras no métricas (Clarke and Fryer, 1998 and Chandler et al., 2005) han contribuido a una mayor expansión de estas técnicas abaratando su coste de ejecución.

Numerosos estudios muestran que la precisión de los modelos 3D generados con estas técnicas están en valores cercanos al centímetro (Arias et al., 2007, Yilmaz et al., 2008, Chiabrando et al., 2015, Galizia et al., 2015 and such). En estas investigaciones, se ha evaluado la precisión del método comparando las coordenadas proporcionadas por la estación de trabajo fotogramétrica digital con las coordenadas obtenidas por medio de métodos topográficos más precisos con respecto a una serie de puntos distribuidos homogéneamente en el objeto. En este capítulo, se muestra un método fotogramétrico emergente de bajo coste para la documentación geométrica de alta resolución, fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*), que es ideal para la investigación de patrimonio arquitectónico de bajo presupuesto. Los manuales fotogramétricos para desarrolladores de *software* brindan indicaciones estandarizadas de las distribuciones espaciales de la toma fotográfica para la implementación de *SfM*. Sin embargo, en el campo de los centros históricos, es común encontrar lugares donde estas indicaciones metodológicas no son aplicables. El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología que se ajuste a estas particularidades geométricas, permitiendo el procesado de imágenes a partir de esta técnica.

El capítulo está estructurado de la siguiente manera. El procesado *Structure from Motion* se describe en la sección 2. La metodología de toma de imágenes se muestra y analiza en la sección 3. La sección 4

describe en detalle la adaptación metodológica de la toma que permite la restitución fotogramétrica de tipologías comunes en un centro histórico, así como las tareas principales que requiere este proceso. Los resultados gráficos y numéricos se presentan en la sección 5. Finalmente, las conclusiones principales de este estudio se presentan en la sección 6.

5.2. Algoritmos *Structure from Motion* (SfM).

La fotogrametría *SfM*, funciona bajo los mismos principios básicos que la fotogrametría convencional, es decir, que los datos 3D pueden resolverse desde un mínimo de dos puntos de vista diferentes como se muestra en la figura 1, donde $P(X, Y, Z)$ es el punto 3D que debe ser medido, P_1 y P_2 son sus proyecciones en las imágenes y C_1 y C_2 son los centros ópticos de las dos cámaras (Orteu, 2009). Sin embargo, difiere fundamentalmente de la fotogrametría convencional en que la geometría de la escena, las posiciones y la orientación de la cámara se determinan automáticamente mediante un procedimiento de ajuste del bloque de modo iterativo y altamente redundante, basado en características de las imágenes extraídas automáticamente (Snavely et al., 2008).

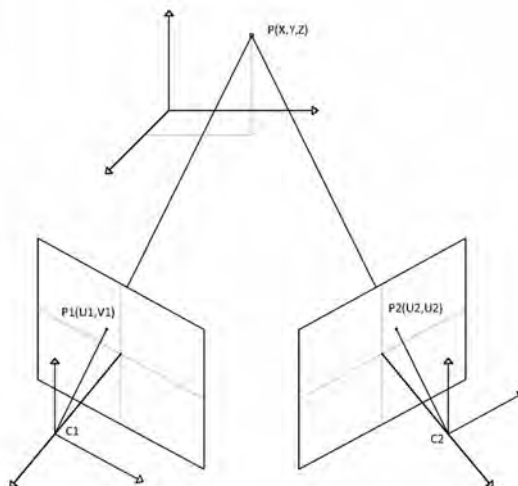


Figura 1. Principio de Visión Estereoscópica

Esta técnica tiene sus orígenes en la comunidad de visión por ordenador (Spetsakis & Aloimonos, 1991; Richard Szeliski & Kang, 1994) y el desarrollo de algoritmos automáticos de coincidencia de características (Harris & Stephens, 1988; Otto & Chau, 1989). Una gama de motores de procesamiento “en la nube”, especialmente *Photosynth* (Microsoft Corporation, EE. UU.) Ha popularizado la técnica de *SfM* (Snavely et al., 2008). Recientemente, servicios gratuitos de computación “en la nube”, como *123D Catch* (Autodesk Inc., EE. UU.) (Lavy et al., 2015), *ARC3D* (Ku Leuven, Belgium) (Tingdahl & Van Gool, 2011) o *Recap Photo* (Autodesk Inc., USA) (Ružić et al., 2014), o servicios de computación local, como *Apero MicMac* (IGN, France) (Deseilligny & Clery, 2011), se han presentado como alternativas gratuitas o de bajo coste, a opciones de *software* profesional como *PhotoScan* (Agisoft LLC., Russia) (De Reu et al., 2013b), *Photomodeler Scanner* (Eos System Inc., Canada) (Barazzetti et al., 2011) o *Pix4D* (EPFL, Switzerland) (Turner et al., 2014).

Los métodos fotogramétricos tradicionales requieren las ubicaciones tridimensionales de una serie de puntos de control en las imágenes. Los puntos de control se identifican manualmente, y mediante el método general de la fotogrametría, se determina la posición y orientación de las tomas fotográficas. Por el contrario, en *SfM*, la ubicación y orientación de las cámaras y la geometría de la escena se reconstruyen simultáneamente a través de la identificación automática de las características coincidentes, o lo que es lo mismo, identificación automática de puntos homólogos. Estos puntos permiten realizar estimaciones iniciales de las posiciones de la cámara y las coordenadas del objeto, que luego se refinan de forma iterativa por mínimos cuadrados. El paso inicial es la identificación de características en imágenes individuales (puntos clave). Una solución popular para esto es el algoritmo *Scale-Invariant Feature Transform* (*SIFT*) (Chandran et al., 1997). Tras la identificación de los puntos clave, se utiliza el algoritmo *Bundler Adjustment* (Pierrot Deseilligny & Clery, 2012; Snavely et al., 2008) para estimar las posiciones y orientaciones de las cámaras y extraer una nube de puntos dispersa de objeto. Posteriormente, se puede obtener una nube de puntos de mayor densidad a partir del algoritmo *Clustering View for Multi-view Stereo*

(CMVS) y del algoritmo *Patch-based Multi-view Stereo (PMVS2)* (Furukawa and Ponce, 2007 and Furukawa et al., 2010)

Una de las características de la fotogrametría de *SfM* es la calibración inversa de los parámetros de orientación. La calibración previa de la cámara no es necesaria ya que la escena en sí se utiliza como plantilla de calibración. La aparición de estas técnicas nos ha permitido trabajar con superficies complejas. (Barazzetti et al., 2011) y obtener nubes de puntos, mallas de triángulos y, finalmente, un modelo texturizado tridimensional completo (Westoby et al. 2012).

5.3. Toma fotográfica

Además de las capacidades del *software* y la calidad de las imágenes, ya que el procesado de las fotografías se realiza automáticamente, uno de los principales factores que afectan la calidad de los resultados de un procesado fotogramétrico, es la situación de las tomas fotográficas. Como se señala en la figura 2, los diferentes tipos de toma se pueden clasificar por la relación entre sus direcciones y las líneas que unen los centros ópticos (líneas base). La toma convergente (Figura 2 -A), obtiene resultados más precisos que la configuración perpendicular (Figura 2 -B). Se requieren menos imágenes para obtener la misma cobertura estereográfica, y tiene una mayor confiabilidad interna (Mason, 1995). La disposición oblicua (Figura 2 -C) también es una opción a considerar.

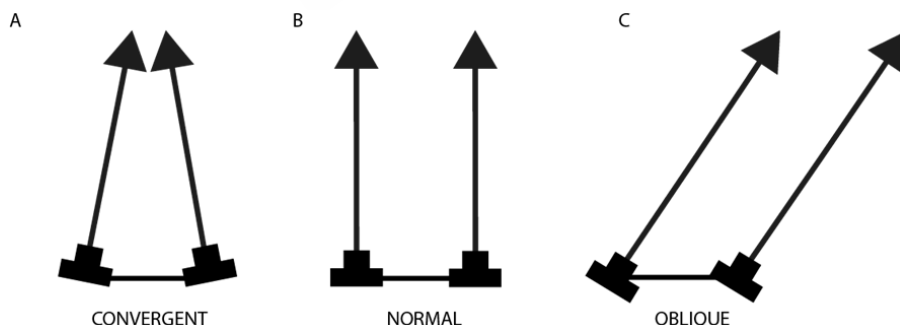


Figura 2. Clasificación de los tipos de toma. (A) Toma perpendicular. (B) Toma convergente. (C) Toma oblicua.

En este capítulo se utiliza *Agisoft PhotoScan* para el procesado de las imágenes. Como se describe en el manual del *software*, la figura 3 muestra la disposición convergente óptima de las tomas de fotos para obtener un modelo 3D de un objeto aislado. Para la documentación de las fachadas, el manual de *PhotoScan* recomienda una disposición fotográfica normal, como se muestra en la figura 4. Como se menciona en el apartado introductorio, las características geométricas del centro histórico (fachadas complejas, calles estrechas, soportales) condicionan en gran medida la elección de la metodología de la fotografía. Por lo tanto, la disposición de la toma debe adaptarse a las singularidades de cada caso particular.

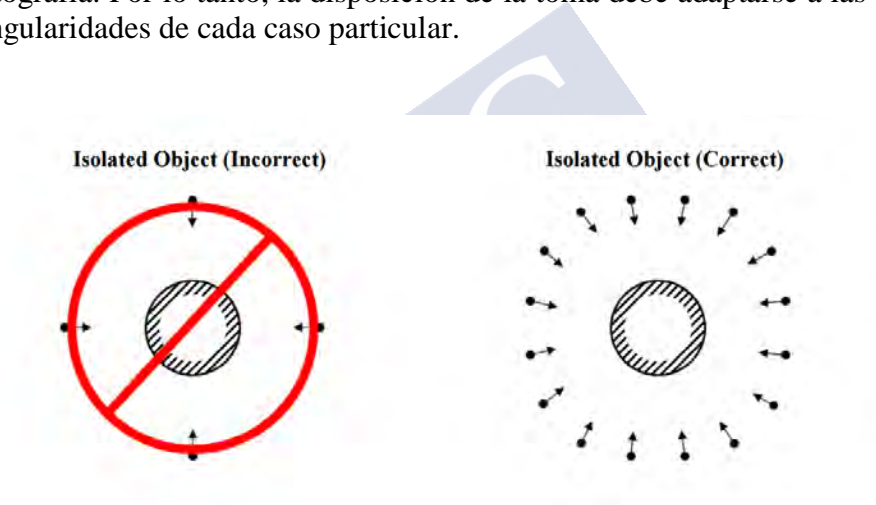


Figura 3. Disposición de toma fotográfica para un objeto aislado. Figura obtenida del manual de usuario de *Agisoft PhotoScan*.

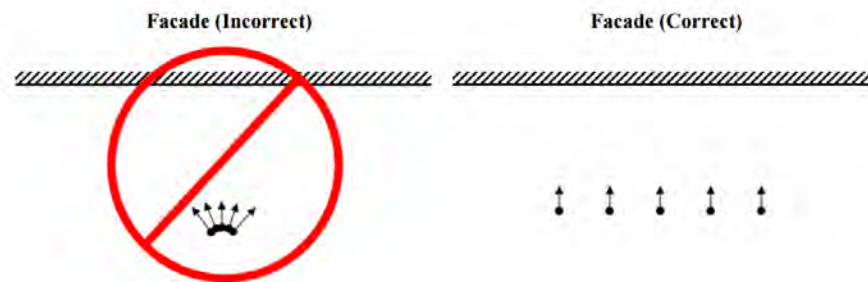


Figura 4. Disposición de toma fotográfica para fachadas. Figura obtenida del manual de usuario de *Agisoft PhotoScan*.

Según lo indicado por los desarrolladores, el *software* acepta diferentes tipos de disposición fotográfica, convergiendo en el caso de una figura aislada y perpendicular en el caso de una fachada. Ambas disposiciones pueden modificarse, o incluso combinarse, como se muestra en (Boukerch et al., 2016). Teniendo en cuenta esta adaptabilidad, este estudio muestra cómo resolver los problemas geométricos planteados por las fachadas de los centros históricos para obtener modelos 3D del patrimonio arquitectónico a partir de fotogrametría *SfM*. Se utilizan para ello varias opciones de disposición fotográfica, en casos con limitaciones de espacio extremas, donde las indicaciones estándar no son aplicables. El objetivo es encontrar una metodología universal aplicable para el modelado de fachadas dentro del centro histórico de cualquier ciudad, adaptando las consideraciones hechas por estudios anteriores y por los desarrolladores de *software* a la documentación geométrica de los edificios en centros históricos. Esta metodología cumplirá las condiciones de alta precisión, alta velocidad y bajo coste de implementación, proporcionando así una alternativa viable y técnicamente más avanzada a los métodos tradicionales.

5.4. Metodología

5.4.1. Fachadas analizadas

Para cumplir con el objetivo del estudio, el espacio se divide en unidades de intervención menores, denominados casos individuales, que se clasifican según sus características geométricas (calles, plazas, soportales, etc.). Para cada caso individual, se selecciona un ejemplo de una fachada ubicada en el centro histórico. La figura 5 -C muestra su ubicación específica. La ciudad de Santiago de Compostela (Figura 5 -B), en España (Figura 5 -A), es elegida para ilustrar este estudio.

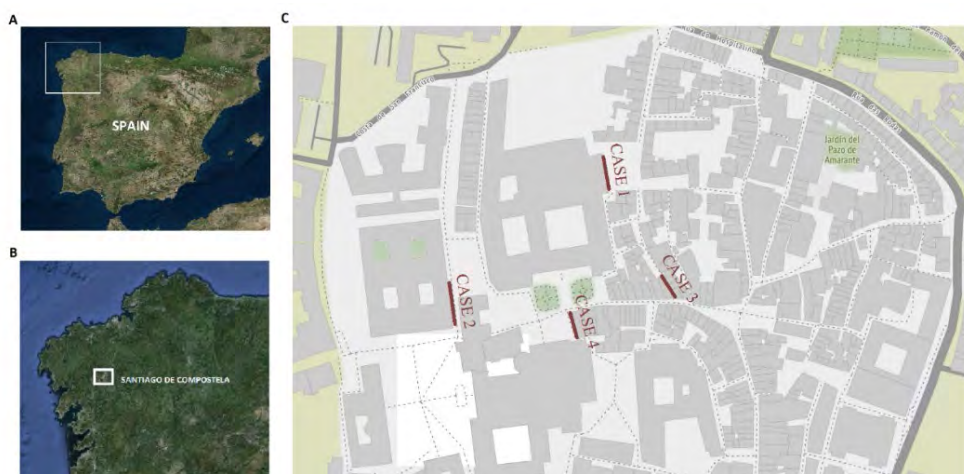


Figura 5. Localización de casos individuales en el centro histórico de Santiago de Compostela (C), Galicia (B), España (A). Fachada significativa (Caso 1), fachada en una calle estándar (Caso 2), fachada en calle estrecha (Caso 3), fachada con soportales (Caso 4).

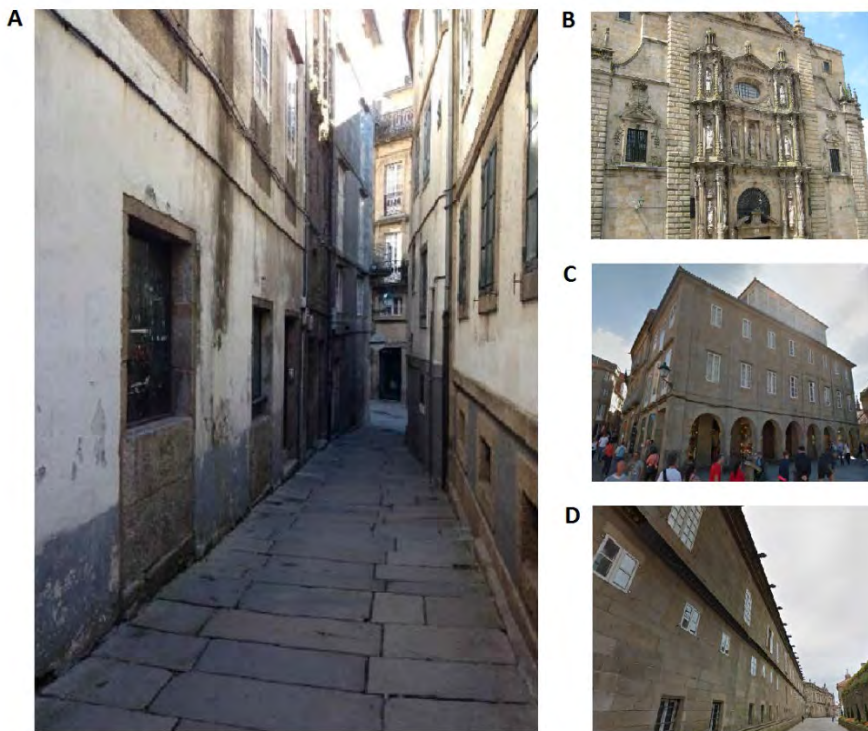


Figura 6. Fachadas estudiadas. (A) Fachada en calle estrecha. (B) Fachada significativa. (C) Fachada con soportales. (D) Fachada en calle tipo.

5.4.1.1 Caso N. 1: Fachada significativa.

Este caso incluye todas las fachadas significativas, tales como edificios religiosos o institucionales. Como ejemplo, se ha elegido la fachada del convento de *San Martín Pinario* en la plaza *San Martiño* (Figura 6 -B).

5.4.1.2 Caso N. 2: Fachada en calle estándar.

Este es el caso individual más común en los centros históricos. Abarca todas las fachadas ubicadas en calles que tienen anchos más cortos que las alturas de las fachadas que se deben documentar. La fachada del *Hostal dos Reis Católicos*, ubicado en *Rúa de San*

Francisco, es el ejemplo considerado para este grupo. Un caso excepcional sería una calle con un ancho inferior a un tercio de la altura de la fachada, que se tratará en el siguiente grupo (Figura 6 -D).

5.4.1.3 Caso N. 3: Fachada en calle estrecha.

También comunes en los centros históricos, pero que conllevan una mayor complejidad en la documentación de fachadas, son las calles estrechas con anchos que limitan la práctica de la fotogrametría según la metodología estándar (menos de un tercio de la altura de la fachada). Para ilustrar este caso, se selecciona la calle “Rúa da Troia”, de 2 a 2,5 m. de ancho con una altura de fachada aproximada de 12 m. (Figura 6 -A).

5.4.1.4 Caso N. 4: Fachada con soportales.

Los edificios con soportales en sus fachadas serán tratadas dentro de este grupo. Los soportales son parte de las fachadas y, debido a sus morfologías, se presentan como un caso extremo para la aplicación de técnicas fotogramétricas. Para ilustrar este caso, ha sido elegida como ejemplo la fachada ubicada en “Praza da Inmaculada” (Figura 6 -C).

5.4.2. Material

El uso de una cámara *réflex* de objetivo único (SLR) para el escaneo fotogramétrico se recomienda especialmente desde un punto de vista técnico. Aunque una cámara compacta permite obtener resultados aceptables, el uso de un dispositivo de captura para el cual se puede ajustar el tiempo de exposición, el formato de archivo, el enfoque, la apertura y otros parámetros fotográficos, garantiza resultados más precisos. Esta es la razón por la que, en los casos 1 y 3, se utiliza una cámara SLR digital Canon EOS 60D con 18 megapíxeles (5184×3456 píxeles) y un tamaño de sensor de $22,3 \times 14,9$ mm, que se corresponde a un tamaño de píxel de $4,30 \times 4,30$ micras, junto con una lente Canon EF-S 18-135 mm f / 3.5-5.6.

También se utiliza un trípode fotográfico profesional de aluminio para la toma en estos casos, no obstante, para los casos 2 y 4, se prescinde de su utilización, en favor de una toma más ágil. Además, en estos casos, se utilizó la cámara integrada de un *SmartPhone*, iPhone 5, con una resolución de 8 megapíxeles (3264×2448 píxeles) y un tamaño de sensor de 4.56×3.43 mm, que se corresponde a un tamaño de píxel de 1.40×1.40 micras. Este dispositivo tiene una lente de zafiro con una distancia focal de 4 mm y una apertura máxima de $f / 2.4$.

Para escalar y orientar los modelos y verificar su precisión, se midieron las coordenadas de una serie de puntos de control en las fachadas utilizando una estación total con medición láser, en este caso una Pentax R-325EX, con un error de distancia de ± 5 mm + 3 ppm y 6 “de precisión angular.

Para el procesamiento de imágenes, se utilizó el *software PhotoScan Professional* (64 bits) con licencia de Agisoft LLC St. Petersburg (Rusia). El equipo informático consistía en un procesador Q6600 con 8 GB de RAM, por lo que los tiempos de procesamiento son relativos a la velocidad del mismo.

5.4.3. Toma fotográfica

A pesar de las recomendaciones del desarrollador del *software*, con el objetivo de demostrar la adaptabilidad de esta técnica, logrando así una disposición de imágenes que sea más adecuada para la reconstrucción de la escena, la disposición fotográfica empleada en cada caso de estudio es variable. Como se justifica en la introducción, el tipo de sesión fotográfica recomendable es la convergente cuando el espacio disponible lo permite. Para los casos en los que no es posible adoptar esta disposición fotográfica, debido a las limitaciones de espacio (casos 2, 3 y 4), se proponen soluciones alternativas. Las especificaciones metodológicas para la adquisición de imágenes de cada caso individual de este estudio se describen a continuación.

5.4.3.1 Fachada significativa - Caso 1

El espacio no suele ser una limitación cuando se trata de una fachada significativa; Por ello, se utiliza una distribución fotográfica convergente en este caso. Es decir, se tomó una serie de fotografías describiendo un arco, con tomas dirigidas hacia un punto ficticio ubicado detrás del elemento, cubriendo toda la superficie de la fachada, como se muestra en el gráfico (Figura 7). Para evitar errores en el procesado, las fotos tomadas deben formar un ángulo de intersección de menos de 15 grados. Se tomaron veintiocho fotografías, repartidas en dos pasadas (superior e inferior), con la cámara Canon Eos 60D.

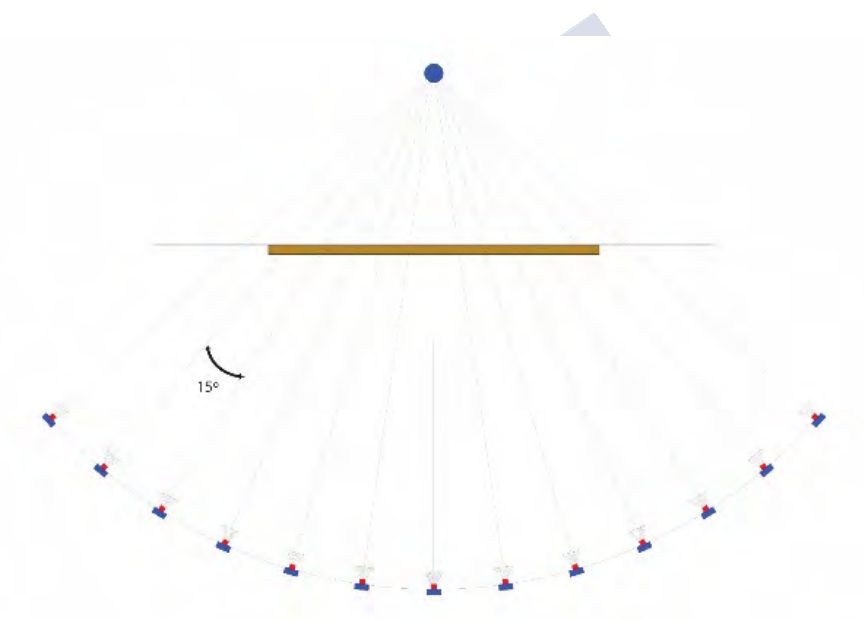


Figura 7. Disposición de toma fotográfica. Fachada significativa (Toma convergente).

Aunque el espacio no es una limitación en este caso, la altura de la fachada puede serlo. Es común encontrar salientes en las partes superiores, sobre el plano de fachada, que generarán partes ocultas en el modelo (Figura 8). Este problema se puede resolver elevando la toma

con un dispositivo como una pértiga, aunque en este caso, la técnica puede ser menos operativa y además este problema ya está presente tanto en las técnicas tradicionales como en el escaneo láser terrestre. Esta es la razón por la que se descartó su uso en este estudio, solventando esta problemática a partir una sesión de fotos, realizada a una distancia de la fachada (D) igual a la altura de la fachada (H), como se muestra en la figura 8. Por lo tanto, el ángulo de incidencia vertical en la fachada será de 45 grados en el caso más desfavorable, en el cual se puede generar un área oculta de la misma magnitud que el saliente que la causa.

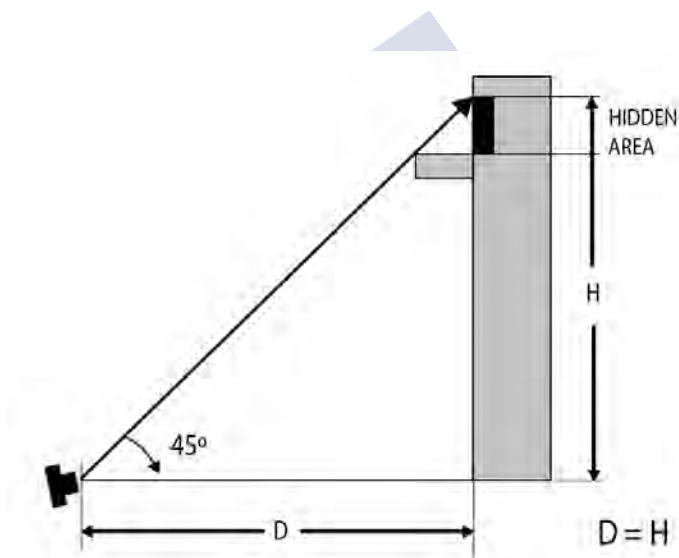


Figura 8. Zona oculta causada por un saliente. Ángulo máximo de incidencia.

5.4.3.2 Fachada en calle estándar o tipo - Caso 2

Este caso es el más común en los centros históricos; por lo tanto, se opta por la opción técnica que permite una mayor flexibilidad de implementación. Para este caso en particular, se utilizaron pautas que representan un punto de partida para la documentación métrica de un área completa, con una geometría longitudinal como la fachada a lo

largo de una calle, desarrollando de este modo un flujo de trabajo rápido, flexible y económico para dicha documentación, como indican los objetivos de este estudio.

Este caso consiste en el levantamiento de un elemento longitudinal en el que el espacio está limitado por la fachada opuesta. Para abordar este problema y crear una situación más favorable, se utiliza una disposición fotográfica oblicua con un ángulo de 45 grados con respecto al plano de la fachada, logrando así una superposición del 90%. En este caso, es necesario tomar fotografías en ambas direcciones, como se muestra en el gráfico (Figura 9). Al final de cada pasada, se toma además una serie de fotografías de enlace para evitar cambios repentinos en las perspectivas de las imágenes adyacentes, cambiando progresivamente el ángulo oblicuo de 45 grados a la perpendicular y, finalmente, a un ángulo oblicuo de 45 grados en la dirección opuesta. Esto permitirá que el *software* conecte las fotos de ambas pasadas, mientras que en ausencia de estas imágenes de enlace, el *software* no es capaz de unir ambos grupos, a no ser que se identifiquen manualmente puntos comunes entre ellos.

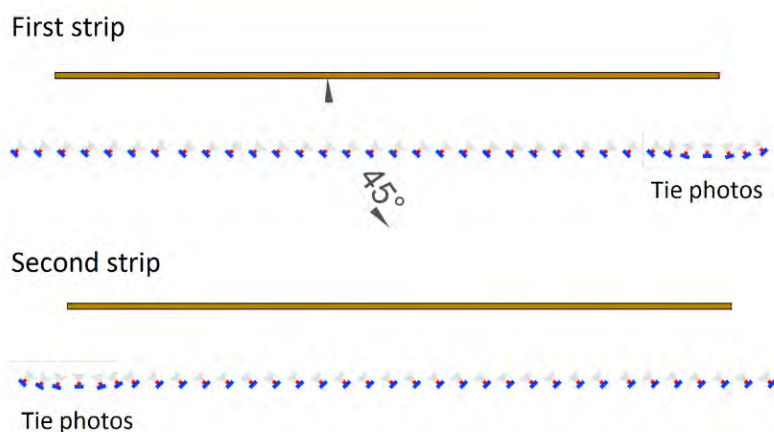


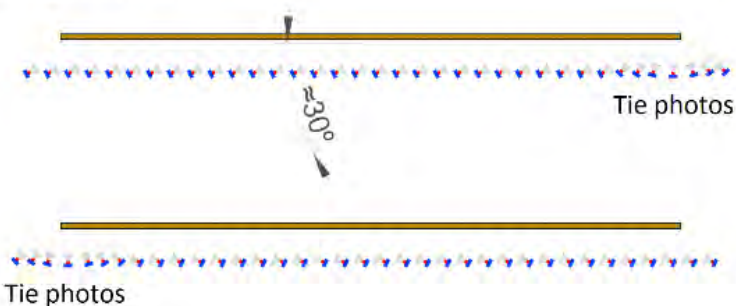
Figura 9. Disposición de toma fotográfica. Fachada en calle tipo.

5.4.3.3 Fachada en calle estrecha - Caso 3

El modelado de fachadas en este caso excepcional es difícil de ejecutar mediante la disposición espacial habitual de la sesión fotográfica. Inicialmente, se tomaron fotografías oblicuas a aproximadamente 30 grados con respecto al plano de la fachada. Como en el ejemplo anterior, se obtuvieron dos pasadas junto con fotos de enlace, como se muestra en la figura 10-A.

Para la parte superior del edificio, se tomaron tantas fotografías como fue necesario desde cada punto de vista, para cubrir la altura de la fachada, avanzando aproximadamente un tercio del área cubierta en la imagen anterior para asegurar la superposición vertical (solape vertical del 66%). De manera similar, para garantizar una superposición horizontal suficiente entre las imágenes adyacentes, el progreso entre los puntos de muestreo se limitó a no más de un tercio de la distancia del área documentada horizontalmente en las fotografías inferiores. Las fotografías inferiores se tomaron como referencia porque son las más limitantes en términos de ángulo de visión.

A. Diagonal shots



B. Longitudinal shots

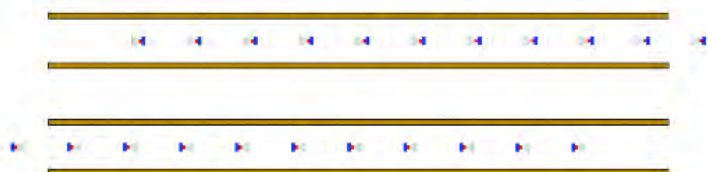


Figura 10. Disposición fotográfica. Caso 3, fachada en calle estrecha. (A) Tomas oblicuas. (B) Tomas longitudinales.

Aplicando esta disposición de toma, se obtuvieron fotografías de diferentes ángulos de visión de todas las áreas de la fachada, utilizando el limitado espacio disponible y proporcionando la mejor calidad visual posible. Incluso las partes superiores, que son las más alejadas, obtienen una mayor superposición entre las fotografías, homogeneizando el resultado final.

Sin embargo, aunque proporcionó una buena calidad visual en la obtención de textura, esta distribución de tomas de fotos causó errores geométricos en ciertas áreas. Debido a que la técnica de *SfM* se basa en la correlación de imágenes, un error en las orientaciones de una imagen provoca errores en las orientaciones de las imágenes posteriores. Para resolver este problema, se obtuvieron dos nuevas pasadas,

correspondientes a cada una de las direcciones de avance, colocando la cámara en el medio de la calle y ajustándola longitudinalmente, como se muestra en la imagen (Figura 10 -B). En las imágenes obtenidas, se registraron las fachadas de ambos lados. Por lo tanto, el espacio limitado, que originalmente era un problema, se convirtió en una ventaja, ayudando al *software* a determinar la geometría correcta de la escena. Esto se debe a que la superposición de estas imágenes fue muy alta, ya que están enfocadas en la parte inferior de la calle, agregando nuevos ángulos de visión que proporcionaron solidez al cálculo.

Finalmente, la cantidad de imágenes necesarias para cubrir la sección apenas aumentó porque se necesitaron menos puntos de toma para cubrir la misma área. Además, estas imágenes se utilizaron en la documentación de la fachada y su fachada opuesta.

5.4.3.4 Fachada con soportales - Caso 4

Para la documentación 3D de un conjunto de fachadas con soportales, se identificaron dos áreas de trabajo diferentes: la fachada externa la cual se trata en primer lugar, y su contraparte interior, tratada en segundo lugar. Para modelar la fachada externa, recurrimos a la misma técnica que en el caso 1 “fachada significativa”, por lo que se aplica una distribución fotográfica convergente (Figura 11 -A).

La documentación de la parte interior del soportal está limitada en términos de espacio e iluminación, por lo que se dividió en porciones longitudinales de 20 m, que se documentan individualmente. Se probaron diferentes ubicaciones de cámaras. Primero, se trató de generar el modelo a partir de una toma longitudinal a través del soportal. Como resultado, se obtuvo la orientación correcta en la primera dirección de la toma, pero el *software* no orientó las imágenes en la otra dirección. En segundo lugar, se intentó una toma oblicua en esta área. Sin embargo, el contraste de la luz dentro del soportal, entre las zonas internas y externas creó dificultades para tomar fotografías, y no fue posible generar la reconstrucción completa de la escena. Finalmente, se diseñó una distribución de imágenes que unen ambas zonas (interna y externa). Se obtuvieron dos pasadas a lo largo del eje

longitudinal del soportal, capturando sus dos fachadas interiores en cada fotografía. Para unir las dos pasadas internas y externas, se tomaron dos conjuntos de fotografías que rodean los pilares del arco en los extremos del soportal como fotos de enlace (Figura 11 -B).

A. External facade



B. Inner facade

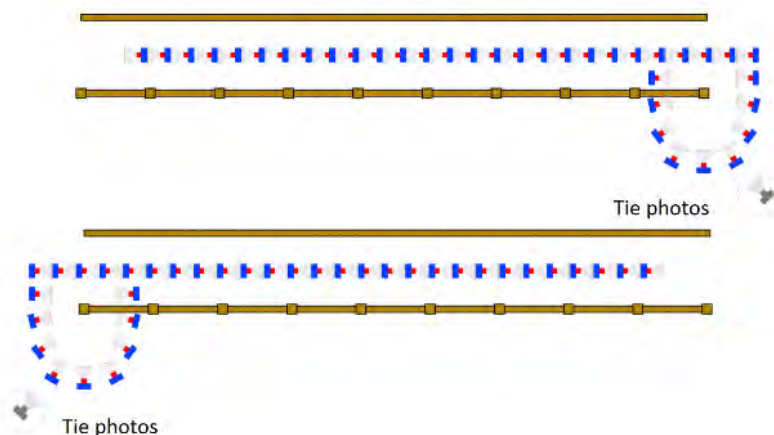


Figura 11. Disposición fotográfica. Caso 4, fachada con soportales. (A) Fachada externa. (B) Fachada interior.

Esta ubicación de la cámara obtuvo los mejores resultados para este caso en términos de calidad geométrica y visual. La alta estabilidad geométrica en la sesión de fotos se descartó en favor de un mayor

número de fotografías tomadas con mayor agilidad, un modo de trabajo que se adapta mejor a este caso complejo.

5.4.4. Procesado fotogramétrico

Una vez que se realiza la toma fotográfica, el flujo de trabajo continúa con el *software Agisoft PhotoScan*. En primer lugar, se cargan las fotos y se inicia el proceso inicial, “orientar cámaras”. Para orientar, escalar y verificar la precisión del modelo, se midieron una serie de puntos de control con la estación total en las fachadas originales. Cinco de ellos se utilizaron para escalar y orientar el modelo. Una vez que los cinco puntos de control se marcaron sobre las imágenes, se realizó la transformación y este se ajustó y orientó de acuerdo con el sistema de referencia de la estación total.

La nube de puntos y la malla 3D fueron generadas por los procesos “Crear nube densa” y “Crear malla”. Finalmente, el modelo de textura fotorrealista se calculó mediante el proceso de “Generar textura” (Figura 12). Estos últimos tres procesos se realizan automáticamente, con la opción de elegir la “calidad” de procesado tanto de la nube como de la malla.



Figura 12. Modelo 3D con textura fotorealista.

Al final del proceso, los restantes puntos medidos, se marcaron directamente en la malla, proporcionando las coordenadas del modelo que se compararon, obteniendo de ese modo las desviaciones métricas reales del producto final.

5.4.5. Obtención y digitalización de ortofotos

Para generar las ortofotos, el *software PhotoScan* permite la definición de los ejes del X e Y, que forman el plano sobre el que se obtiene la vista ortogonal. Posteriormente, en el *software CAD*, estas ortofotos se escalaron utilizando los puntos de control y se digitalizaron los rasgos característicos de la fachada.

Otra opción es la posibilidad de digitalizar vectorialmente los rasgos característicos utilizando el *software* fotogramétrico. *PhotoScan* permite la creación de formas en las ortofotos, obteniendo las entidades vectoriales de la escena directamente. Estas entidades vectoriales pueden exportarse en distintos formatos para su importación en *software CAD* o *BIM*.

5.5. Resultados y discusión

5.5.1. Toma fotográfica

Cuando el espacio no es una limitación como en el primer caso, la disposición convergente es la mejor opción (Figura 7). En calles estrechas y estándar, las distribuciones de toma oblicua, con diferentes ángulos (dependiendo de las limitaciones de espacio) proporcionan mejores resultados. Las disposiciones perpendiculares y convergentes se combinan y aplican, en ocasiones solo para crear imágenes de enlace (Figura 9 y 10). En el caso 4, las fotos de enlace convergen alrededor del pilar del arco (Figura 11). Además, para calles estrechas y soportales interiores es importante capturar ambas fachadas en cada fotografía. Esto es posible mediante la toma de fotografías a lo largo del eje longitudinal de la calle o soportal. Esta metodología ha permitido obtener modelos 3D de calidad, transformando el problema de las limitaciones de espacio, en una ventaja. La información de fachada opuesta y la mayor superposición de estas fotos, aportan robustez geométrica a la escena.

5.5.2. Modelos 3D

En la tabla 1 se muestra una instantánea de cada uno de los modelos obtenidos (Figura 13) y los resultados del procesado.

Tabla 1: Resultados del procesado

Caso	Puntos	Triángulos	Densidad (puntos/m2)
Caso 1 Fachada significativa	1.841.811	3.104.417	2.512
Caso 2 Fachada en calle tipo	313605	658.342	505
Caso 3 Fachada en calle estrecha	557.105	1.110.691	2.790
Caso 4 Fachada con soportales	1.001.323	2.555.187	5.610

MODELADO 3D DE FACHADAS HISTÓRICAS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA SFM.
DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE DISTINTAS TIPOLOGÍAS
ARQUITECTÓNICAS DE UN CASCO HISTÓRICO.

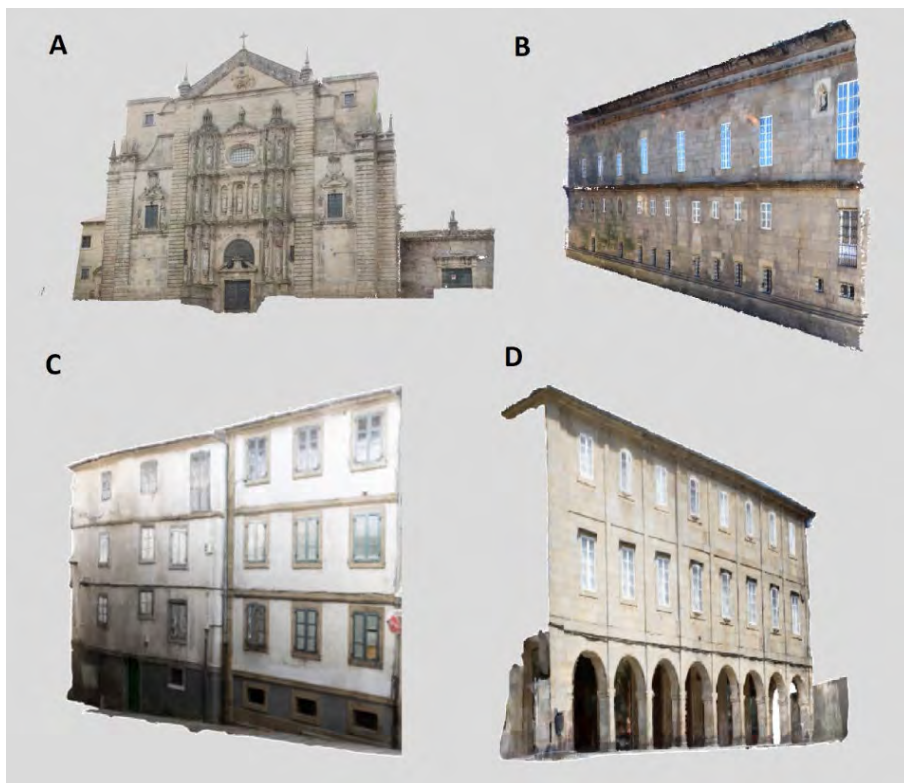


Figura 13. Capturas de los modelos 3D. (A) Fachada significativa, Caso 1 (B) Fachada en calle tipo Caso 2. (C) Fachada en calle estrecha Caso 3. (D) Fachada con soportales, Caso 4.

5.5.3. Precisión

La precisión se evaluó mediante la obtención de coordenadas directamente sobre la malla texturizada, proporcionando así valores reales del error del modelo 3D. La tabla 2 muestra las precisiones obtenidas, el dispositivo fotográfico utilizado y los tiempos empleados en el trabajo de campo y el procesado en cada caso.

TABLA 2: Trabajo de campo y resultados del procesado

Caso	Cámara	Nº Imágenes	Trabajo de campo	Procesado	Error medio	Error relativo
Caso 1	Canon 60D	28	15 min.	7h	0.039 m.	1/1010
Caso 2	Iphone 5	175	20 min.	10h	0.049 m.	1/1030
Caso 3	Canon 350D	113	50 min.	18h	0.026 m.	1/770
Caso 4	Canon 60D + Iphone 5	128	30 min.	16h	0.021 m.	1/1040

Para verificar la precisión de los modelos, el error promedio se obtuvo como la media aritmética de los valores absolutos de las diferencias entre los puntos de coordenadas tomados con la estación total y los mismos puntos obtenidos de los modelos digitales después de escalarse y orientarse en el mismo sistema de referencia utilizado por el instrumental topográfico, en este caso un sistema de referencia local. El error relativo es el resultado de dividir el error medio por la diagonal más larga del elemento. En las figuras 14 a 17, se puede ver la distribución de puntos de control en las fachadas, mostrando en color gris los puntos utilizados para la georreferenciación del modelo.

MODELADO 3D DE FACHADAS HISTÓRICAS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA SFM.
DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE DISTINTAS TIPOLOGÍAS
ARQUITECTÓNICAS DE UN CASCO HISTÓRICO.



Figura 14. Distribución de los puntos de control (GCPs) en el caso 1.



Figura 15. Distribución de los puntos de control (GCPs) en el caso 2.



Figura 16. Distribución de los puntos de control (GCPs) en el caso 3.

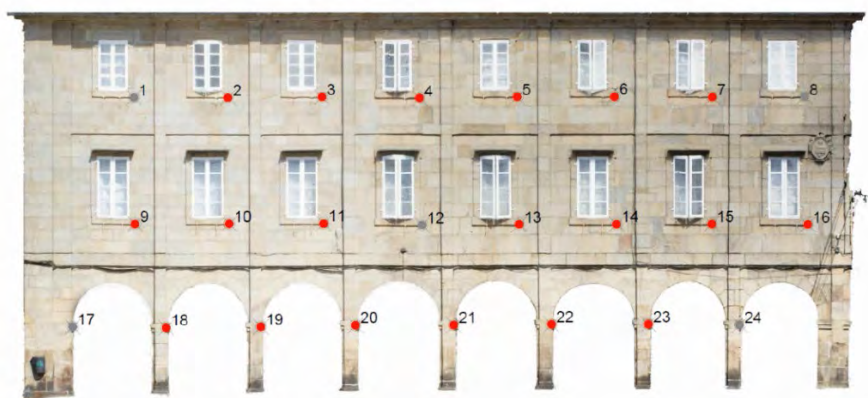


Figura 17. Distribución de los puntos de control (GCPs) en el caso 4.

A continuación se muestran los alzados (Fig. 18) y la digitalización vectorial de los mismos (Fig. 19 y Fig. 20 -A) o ambos productos superpuestos (Fig. 20 -B). Los resultados obtenidos muestran que la pequeña cantidad de espacio frente a la fachada es una limitación que se puede superar. Una toma convergente, a pesar de no

ser la disposición de la cámara recomendada por los desarrolladores de *software*, garantiza una buena precisión con un número de fotos menor (Caso 1). Cuando el espacio es limitado, será necesario aumentar el número de imágenes y adaptar su disposición espacial.



Figura 18. Ortofoto en alzado. Fachada en calle tipo, Caso 2.



Figura 19. Digitalización vectorial, fachada en calle estrecha, Caso 3.



Figura 20. Fachada con soportales, caso 4. (A) Digitalización vectorial. (B) Digitalización vectorial sobre ortofoto.

Dentro de una ciudad histórica y para casos no excepcionales, se obtuvieron buenos resultados utilizando una distribución oblicua (Caso 2). Cabe señalar aquí que la necesidad de una colección de imágenes en cada dirección de avance nos obligó a tomar fotografías de enlace entre las dos pasadas. Esto se debe a que el *software* no puede vincular las áreas entre las imágenes con ángulos de incidencia muy diferentes.

Cuando la ubicación es un caso excepcional (casos 3 y 4), las características geométricas del elemento determinan la disposición de tomas a emplear. Este estudio ha resuelto dos ejemplos extremos que pueden ser útiles para resolver casos similares. En el caso 3 (fachada en calle estrecha), la cercanía de la fachada opuesta, que a priori era un problema, se convirtió en una ventaja al usar imágenes en las que se

registran ambas fachadas, logrando así un modelado automático y un buen resultado. En el caso 4 (fachada con soportales), se deben documentar las dos fachadas interiores. La metodología aquí es similar a la del caso anterior, excepto que el enlace de ambas pasadas se realiza en el área que rodea al último pilar, y las dos pasadas interiores se unen con una pasada externa. Esto aporta solidez geométrica a la escena mejorando los resultados.

5.6. Conclusiones

A la vista de los resultados del estudio, después de haber resuelto satisfactoriamente ejemplos específicos en los que los procedimientos habituales no son aplicables, se puede afirmar que el modelado 3D de fachadas mediante fotogrametría *SfM* de corto alcance es una técnica adaptable, confiable y de alto rendimiento, que ha obtenido precisiones cercanas a las obtenidas por la misma técnica en condiciones óptimas.

Se han resuelto cuatro casos, que abarcan las tipologías edificatorias más comunes en una ciudad histórica. Este enfoque es posible porque actualmente, las capacidades del *software* nos permiten utilizar disposiciones de toma fotográfica más flexibles, siempre que cumplamos con los requisitos de superposición entre las imágenes y que las variaciones de ángulo en las tomas de fotos correlativas sean lo más pequeñas posible. Siempre que se respete este criterio en el diseño de la disposición de las tomas, puede resolverse mediante fotogrametría *SfM* cualquier otra ubicación en un centro histórico.

En los centros históricos, el uso de dispositivos accesibles, como *SmartPhones*, ofrece ventajas como la georreferenciación automática de las imágenes y la posibilidad de obtener modelos 3D de casi cualquier elemento arquitectónico sin una planificación previa de los trabajos. Es por esto que este dispositivo se utilizó en ciertos casos, logrando resultados cercanos a los obtenidos con cámaras SLR. Además, el uso de este dispositivo revela que el número de fotografías utilizadas es más decisivo para la precisión del modelo que la calidad geométrica de las imágenes. En este sentido, la toma con un trípode, especialmente en casos excepcionales como en centros históricos, que

requieren un mayor número de imágenes y donde el espacio de trabajo es limitado, se vuelve complejo y tedioso, perdiendo efectividad en la técnica.

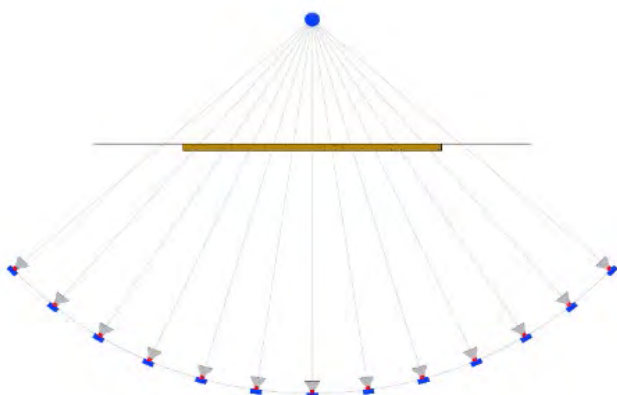
Una conclusión importante de este estudio es la necesidad de obtener fotografías de enlace para unirse a los diferentes grupos de fotografías, aunque no es necesario para obtener la alta resolución y la geometría precisa de un modelo, el uso de fotografías vinculadas es necesario para conectar fotografías de pasadas con diferentes direcciones de toma. Esto se debe a que la técnica *SfM* funciona en fotos correlacionadas para calcular las posiciones 3D de los puntos de muestreo. Un cambio brusco de perspectiva entre dos imágenes adyacentes puede causar errores geométricos en el modelo o una situación en la que el *software* no podrá calcular la geometría completa de la escena.

Después de analizar los resultados, se puede concluir que es de mayor relevancia para obtener modelos 3D de calidad a partir de fotogrametría *SfM*, el número de imágenes y el solape entre ellas, que la calidad y la estabilidad con la que se tomen las mismas. Es por esto que tomar fotos con una gran superposición, de una manera más ágil y sin el uso de un trípode, proporciona modelos con igual o mejor precisión y acelera el proceso, siendo la mejor metodología para resolver las características geométricas complejas habituales en centros históricos, donde la disposición de tomas estándar no es operativa.

Como línea de investigación futura, queda testear la posibilidad de digitalizar dentro del *software* de fotogrametría y exportar los resultados directamente al *software BIM*, un flujo de trabajo que puede generar muchas posibilidades para la documentación y el estudio de estos elementos del patrimonio.

CAPITULO 1. RESUMEN GRÁFICO

TOMA FOTOGRÁFICA



MODELO 3D



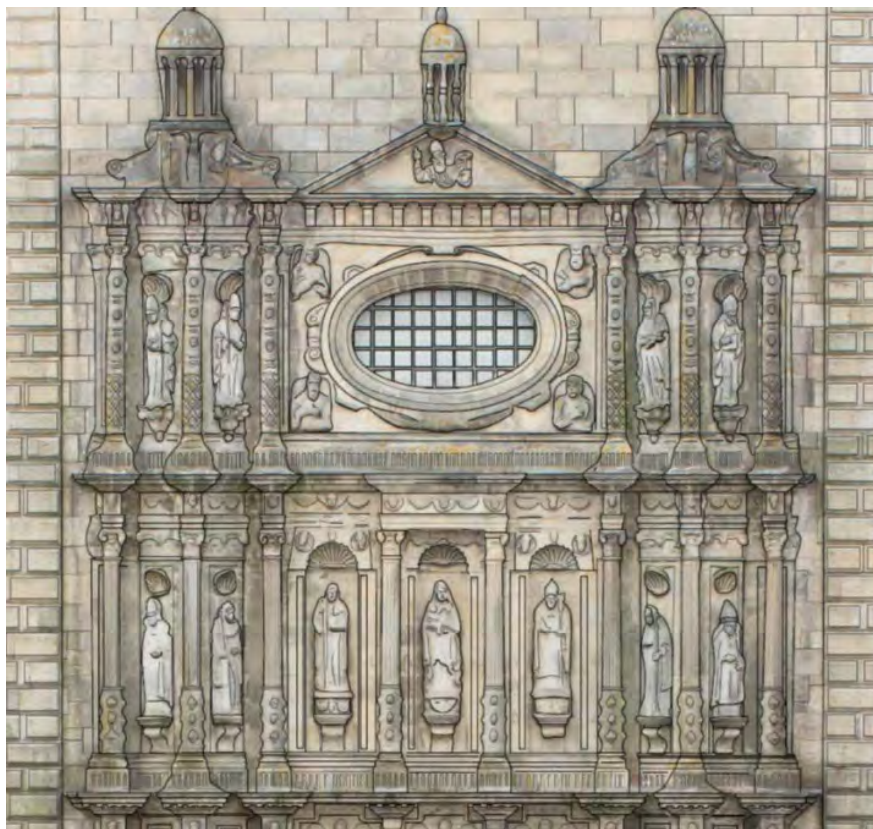
ORTOMOSAICO



VECTORIZACIÓN



ORTOMOSAICO Y VECTORIZACIÓN



6. CAPITULO II

COMPARACIÓN DE *SOFTWARE DESKTOP* PROFESIONAL Y *SOFTWARE GRATUITO* *CLOUD COMPUTING* EN EL MODELADO 3D DE EDIFICIOS HISTÓRICOS: MONASTERIO DE SAN MARTÍN PINARIO

RESUMEN

En las últimas décadas, las técnicas de adquisición de datos en 3D han reemplazado a las técnicas de medición tradicionales en el campo de la arquitectura, la ingeniería y la construcción (AEC). Este estudio emplea fotogrametría *SfM* para el levantamiento de una fachada de un edificio histórico. El procesado con *software* fotogramétrico profesional (*Agisoft PhotoScan* y *Pix4D*) se compara con el procesado con *software* fotogramétrico de bajo coste (*Autodesk Remake*). El objetivo es analizar la precisión de estos programas de *software* y comparar las posibilidades y la facilidad de uso que ofrecen en el flujo de trabajo completo. En este caso, el modelado 3D se realizó en la fachada de *San Martín Pinario*, que es el segundo monasterio más grande de España. Este monasterio se encuentra en la ciudad histórica, de Santiago de Compostela. Se analizan los resultados de procesado, la calidad y precisión geométrica de los mismos, los resultados visuales y la facilidad de uso y posibilidades del *software*, mostrando que el *software* de computación “en la nube” ofrece modelos 3D con calidad y precisión visual similares a los obtenidos con el *software* de escritorio

sin requerir equipos de alto rendimiento y con un flujo de trabajo muy simple. El ahorro de costes y la facilidad de uso hacen que la computación fotogramétrica “en la nube” sea una excelente herramienta de medición para los profesionales del patrimonio no especialistas en fotogrametría.



6.1. Introducción

Los avances tecnológicos han conducido a cambios continuos en los métodos de trabajo para los profesionales de la arquitectura patrimonial. Se observa un claro ejemplo de tales cambios en las herramientas de adquisición de datos métricos, con la aparición de tecnologías de escáner láser y fotogrametría *SfM* que representan alternativas precisas a los métodos de medición tradicionales. Algunas comparaciones de ambas técnicas en aplicaciones arquitectónicas se muestran en (Boehler & Marbs, 2004; Grussenmeyer et al., 2008; Teza et al., 2016). Los profesionales de la arquitectura, la ingeniería y la construcción (AEC), necesitan planes de trabajo y planos detallados para reparaciones, remodelación o mantenimiento de edificios patrimoniales. La inspección de fachadas con técnicas tradicionales es tediosa, difícil y ocasionalmente imprecisa. Estas técnicas implican la realización de mediciones individuales utilizando una herramienta de medición, como una cinta métrica o un distanciómetro láser. Otras técnicas más avanzadas, como la medición con estación total, implican medios más costosos y requieren conocimientos de manejo. Además, hay situaciones en las que las técnicas tradicionales no son operativas, como por ejemplo en fachadas con zonas inaccesibles o incluso en edificios destruidos o dañados cuando la fotogrametría es el único método aplicable. En estos casos, la fotogrametría permite a los arquitectos realizar dibujos para reconstruir con precisión un edificio histórico como se muestra en (Yilmaz et al., 2007) con un edificio destruido por un incendio, en el que no existe la posibilidad de realizar mediciones de campo tradicionales o con escáner láser.

Las técnicas, como los escáneres láser y la fotogrametría *Structure from Motion (SfM)*, están revolucionando el modo de obtener documentaciones geométricas de fachadas de edificios (Dai & Lu, 2010; Ordóñez et al., 2010). Los avances en los escáneres láser han aumentado la demanda de modelos 3D que permiten la documentación y el análisis de formas y dimensiones a altas resoluciones. Estos modelos representan tanto la geometría de los edificios como su textura, por lo que pueden utilizarse en estudios ambientales como se demuestra en (Bui et al., 2009) en el cual se mide la erosión de una

chimenea. Paralelamente a la expansión de los escáneres láser y provocada por la creciente demanda de modelos 3D, la fotogrametría digital, particularmente la fotogrametría *SfM*, ha avanzado considerablemente y ha sido utilizada cada vez más por varios tipos de especialistas, como ingenieros civiles. (Bhatla et al., 2012; Kwak et al., 2013; Stavroulaki et al., 2016), arquitectos (Sužiedelytė-Visockienė et al., 2015; Yang et al., 2016), arqueólogos e historiadores (Bea & Angás, 2017; Gonizzi Barsanti et al., 2013; Johnson & Solis, 2016; Martínez-Rodríguez et al., 2015; Juan Ortiz et al., 2013) o especialistas en medioambiente (Butler et al., 2002; Kaufmann & Ladstädter, 2007). La fotogrametría *SfM* ha ganado interés dado que la inversión requerida para equipos fotográficos y de *software* es sustancialmente menor que la requerida para un escáner 3D. Además, un conjunto de datos se puede integrar en el *software* BIM como se muestra en (Tzedaki & Kamara, 2013). *TLS* y fotogrametría están reemplazando las metodologías tradicionales como se muestra en (Almagro, 2002), pudiéndose incluso combinar ambas técnicas (Al-kheder et al., 2009; Yastikli, 2007).

6.1.1. Fotogrametría *SfM*

La fotogrametría digital ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas. El desarrollo de la triangulación y los algoritmos de extracción de datos 3D basados en imágenes ha mejorado sustancialmente la calidad de los modelos 3D, como se demuestra en (Heipke et al., 2016). De manera similar, las mejoras en la calidad y el coste de las cámaras *réflex* compactas y de lente única (SLR) y los métodos de calibración que permiten utilizar cámaras no métricas (Jh Chandler et al., 2005), han contribuido a una mayor expansión de estas técnicas. A diferencia de la fotogrametría convencional y las primeras versiones del *software* de fotogrametría de corto alcance, que permiten la manipulación exclusiva de puntos seleccionados discretamente y, por lo tanto, de superficies simples, el *software* actual de fotogrametría *SfM* permite el uso de un proceso automatizado con superficies complejas. Las nubes de puntos, las mallas triangulares y los modelos texturizados tridimensionales completos se obtienen de las fotos como se indica en (Remondino & El-Hakim, 2006; Westoby et al., 2012).

Cabe destacar cuatro factores en la evolución de esta técnica. El primer factor es la automatización de la coincidencia de características de imagen (puntos homólogos). El primer paso del procesado inicial en la fotogrametría *SfM*, es la identificación de características en imágenes individuales que se pueden usar para la correspondencia entre ellas. La fotogrametría convencional requiere la identificación de una serie de puntos en las fotos para calcular los parámetros de orientación (Puntos homólogos). Los algoritmos automáticos de coincidencia de características, como el algoritmo *Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)* descrito en (Chandran et al., 1997; Lowe, 2004), han permitido que la identificación de los puntos homólogos en las entre fotografías sea automática, lo que ha reducido significativamente el tiempo requerido para realizar esta tarea. El estado del arte en la coincidencia de imágenes de alta densidad se describe ampliamente en (Remondino et al., 2014). En segundo lugar, en la automatización del proceso de calibración mediante el cálculo inverso de los parámetros de orientación interna como se describe en (Clarke & Fryer, 1998; Fraser, 2013), el *software* reconstruye la escena de acuerdo con datos *EXIF* de cada imagen, junto con las coincidencias entre imágenes obtenidas en el primer paso. Luego, estos parámetros se ajustan de forma iterativa. El algoritmo *System Bundler*, que se describe en (Snavely et al., 2008; Triggs et al., 2000), se utiliza para estimar la posición de la cámara y extraer una nube de puntos “dispersa”. Por lo tanto, las orientaciones internas y relativas y la geometría de la escena se reconstruyen simultáneamente en un solo proceso, sin la necesidad de una calibración previa de la cámara. En tercer lugar, se puede obtener una nube de puntos de mayor densidad gracias al algoritmo *Clustering view for Multiview Stereo (CMVS)* y el algoritmo *Patch-based Multiview Stereo (PMVS2)* (Furukawa et al., 2010; Furukawa & Ponce, 2010). Ambos algoritmos permiten obtener modelos 3D de geometrías complejas de forma automatizada. En cuarto lugar, los avances continuos en las capacidades de computación, en especial con la aparición del *software* de fotogrametría de computación “en la nube”.

6.1.2. *Software de fotogrametría SfM*

Los orígenes del *software* de fotogrametría *SfM* se encuentran en la comunidad de visión artificial (Spetsakis & Aloimonos, 1991; R Szeliski & Sing Bing, 1993) y el desarrollo de los algoritmos automáticos de coincidencia de características descritos en (Harris & Stephens, 1988; Otto & Chau, 1989). Una gama de motores de procesado “en la nube” ha generalizado de la fotogrametría de corto alcance. Recientemente, la computación “en la nube” ha cambiado la comprensión del *software* en general y del *software* fotogramétrico en particular. Los profesionales tienen a su disposición opciones de *software* de escritorio y de computación “en la nube”. Como ejemplos de *software* de escritorio, encontramos Apero Micmac (IGN, Francia) (Deseilligny & Clery, 2011), *Eos Photomodeler* (Eos System Inc., Canada) (Barazzetti et al., 2011), *Agisoft PhotoScan* (Agisoft LLC., Russia) (De Reu et al., 2013b) y *Pix4D Mapper* (EPFL, Switzerland) (Strech et al., 2012). Sin embargo, la tendencia en *software* se está moviendo hacia el uso de recursos de computación “en la nube”. Estos servicios de procesado de imágenes se realizan en un servidor externo. Un ejemplo de este *software* es *Photosynth* (Microsoft Corporation, EE. UU.) o *ARC3D* (Ku Leuven, Bélgica) (Tingdahl & Van Gool, 2011). Otro ejemplo de gran popularidad es *123DCatch* (Autodesk Inc., EE. UU.) (Jim; Chandler & Fryer, 2013); sin embargo, este servicio, no ha evolucionado desde su lanzamiento inicial en 2009, y solo ha estado disponible hasta marzo de 2017. Autodesk Company ha implantado en su lugar los servicios de computación *SfM* “en la nube” con *Recap Photo* (2012) (Fritsch et al., 2013), *Autodesk Memento* (Johnson & Solis, 2016), y *Autodesk Remake* (Nikolov & Madsen, 2016). Desde 2017 *Recap Photo* es la única opción disponible. Incluso los dispositivos móviles son capaces de tomar fotos y realizar un procesado fotogramétrico a través de la nube (*123D Catch*) o con aplicaciones locales como *TRNIO* o *SCANN3D*.

6.1.3. Modelado de edificios con fotogrametría *SfM*

El uso de la fotogrametría *SfM* ofrece nuevas posibilidades en el estudio de la arquitectura como se demuestra en (Murtiyoso et al., 2017), en el que emplea drones para el modelado 3D de edificios, y una gran adaptabilidad a zonas complejas como se señala en (Peña-Villasenín et al., 2017), donde se analiza el proceso de modelado 3D de diferentes tipos de edificios. Un ejemplo de *software* de fotogrametría de computación “en la nube” aplicado en el patrimonio arquitectónico se presenta en (Santagati & Inzerillo, 2013). Sin embargo, en estos estudios, los resultados y el flujo de trabajo de la fotogrametría *SfM* se comparan con otros métodos de medición, como los métodos tradicionales en (Peña-Villasenín et al., 2017) o láser escáner en (Murtiyoso et al., 2017; Santagati & Inzerillo, 2013; Teza et al., 2016). En (Murtiyoso et al., 2017), también se analizan algunas opciones de escritorio; sin embargo, la confiabilidad de la computación “en la nube” en comparación con el *software* de escritorio sigue sin estar clara. Los algoritmos son similares en el *software* de computación de escritorio y en la nube, no obstante las actualizaciones constantes de los mismos, y la pérdida de control por parte del técnico del procesado fotogramétrico en la computación “en la nube” hace que se necesiten estudios periódicos para evaluar la calidad de los modelos resultantes.

Por este motivo, en este estudio se analizan los resultados de la documentación de fachadas obtenidas con el *software* de computación “en la nube” de bajo coste *Autodesk Remake*, con el *software* profesional de escritorio como *Pix4D Mapper* y *Agisoft PhotoScan*. Este estudio también compara los resultados obtenidos con las dos opciones de *software* de escritorio mencionadas, los cuales son utilizados ampliamente para trabajos fotogramétricos profesionales. En esta comparación, se analizan los rendimientos del procesado en tiempos y costes, la calidad visual y la precisión geométrica de los modelos 3D resultantes y la facilidad de uso y posibilidades del *software* estudiado.

6.2. Metodología

6.2.1. Caso de estudio: fachada posterior del *Monasterio de San Martín Pinario*.

La comparación se realiza considerando una colección de imágenes de la fachada del monasterio de *San Martín Pinario*, que se construyó entre los siglos XVI y XVIII. El monasterio de *San Martín Pinario* y la catedral de Santiago de Compostela (Figura 1-A) representan el conjunto barroco gallego más relevante. Este monasterio es el segundo más grande de España (Figura 1-B) después de El Escorial (Madrid). De su importancia se destaca su relevancia arquitectónica, religiosa y artística (Crocí et al., 1997; Vicente López, 2016). Sus características y variedad de superficies hacen que sea una opción idónea para este estudio. El monasterio incluye varias zonas con distintas superficies, incluyendo zonas lisas, ásperas, planas y muy texturizadas con algunas ventanas y puertas e incluye algunas zonas de ornamentos altamente detallados, siendo un caso representativo de una fachada significativa de un centro histórico.

El monasterio de *San Martín Pinario* se encuentra cerca de la catedral de Santiago de Compostela. La Figura 1-C muestra la posición prominente del edificio en relación con su entorno, lo que demuestra su importancia cultural. Su fachada este (Figura 1-D) está bien situada para facilitar el acceso fotográfico debido a su ubicación en una plaza amplia.

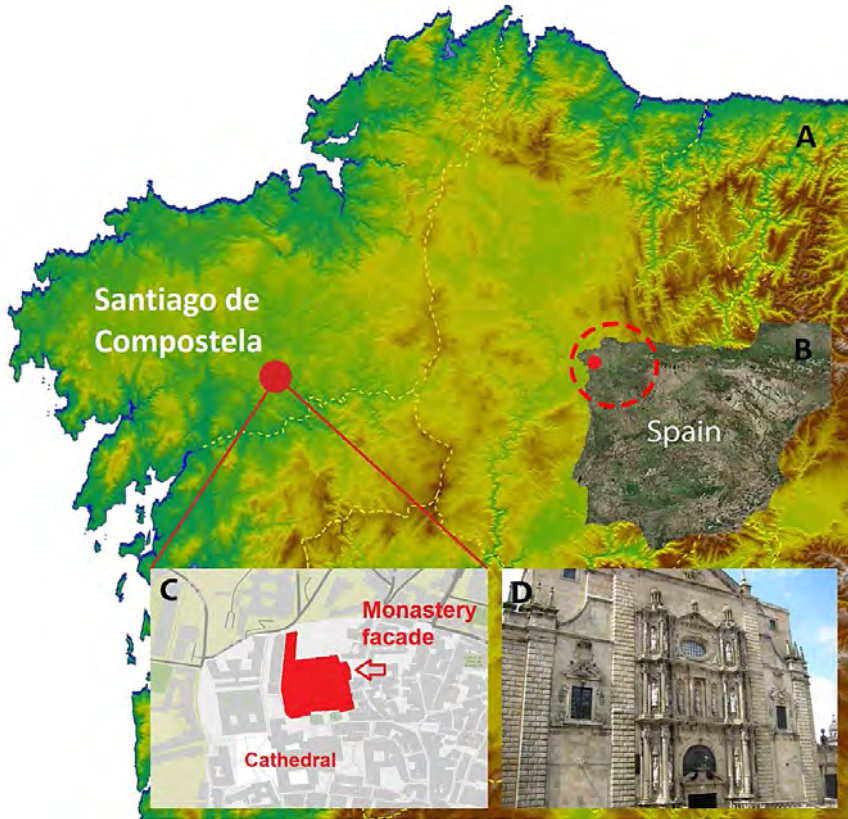


Figura 1. (A) Galicia. (B) España. (C) Callejero Santiago de Compostela. (D) Fachada del Monasterio de *San Martín Pinario*.

6.2.2. Equipamiento

Se utilizó una cámara digital *réflex*, Canon EOS 60D, con 18 megapíxeles ($5,184 \times 3,456$ píxeles) y un tamaño de sensor de 22.3×14.9 mm, que corresponde a un tamaño de píxel de $4.30 \times 4.30 \mu\text{m}$. La lente empleada se corresponde con una Canon EF-S 18-135 mm f / 3.5-5.6. Para la toma se utilizó un trípode fotográfico profesional de aluminio.

Para escalar, orientar y verificar la precisión de los modelos 3D, se midieron las coordenadas de varios puntos distribuidos en la fachada utilizando una estación total con medición laser *Pentax R-325EX* con un error de distancia de $\pm 5 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$ y una precisión de ángulo de $6''$. Los primeros 6 puntos medidos se dispusieron en las esquinas y en el área central de la fachada, y estos puntos se utilizaron como puntos de control (*GCP*) para escalar y orientar el modelo 3D. Otros 17 puntos en la fachada fueron medidos y utilizados como puntos de verificación o *Check Points (CP)*. Los *CP* medidos se compararon con las coordenadas identificadas en la malla 3D para determinar la precisión geométrica del modelo.

Las versiones que son testeadas en este estudio son la 1.2.0 de *Agisoft PhotoScan*, la versión 2.0.104 de *Pix4D Mapper* y la versión 17.23.1.69 de *Remake*. El equipo informático utilizado consta de un procesador i5 4460 con 32 GB de memoria *RAM*. El precio actual de una licencia permanente para *PhotoScan* es de 3.500 USD. La licencia permanente de *Pix4D* es de aproximadamente 6,900 USD. *Autodesk Remake* no ofrece una licencia permanente, pero ofrece una suscripción anual de 300 USD. *Remake* y *Pix4D* permiten licencias mensuales por 30 y 280 USD respectivamente.

6.2.3. Toma fotográfica

Para cumplir con el objetivo de este estudio, se usó una sesión de fotos común de tal manera que los tres programas de *software* usaron la misma información gráfica. Se obtuvieron un total de 28 fotos a una distancia similar a la altura de la fachada, con velocidades de obturación relativamente largas ($1/25$ a $1/40$), con una sensibilidad *ISO* 100, con una apertura de $F / 8$ y utilizando trípode y un disparador. De esta manera, se minimizó la vibración de la cámara y los parámetros de la foto fueron apropiados para obtener imágenes de alta estabilidad geométrica. Las disposiciones de las tomas fotográficas se alinearon en la medida de lo posible con una toma convergente, como se muestra en la Figura 2-B. Esta es la disposición de toma de fotos recomendada por los desarrolladores de *software* y ofrece la mejor precisión teórica para la orientación (Mason, 1994). En la toma paralela (Figura 2-A), el

ángulo de los rayos homólogos es más pequeño que en la toma convergente, lo que genera una zona de incertidumbre mayor (zona indicada en color gris).

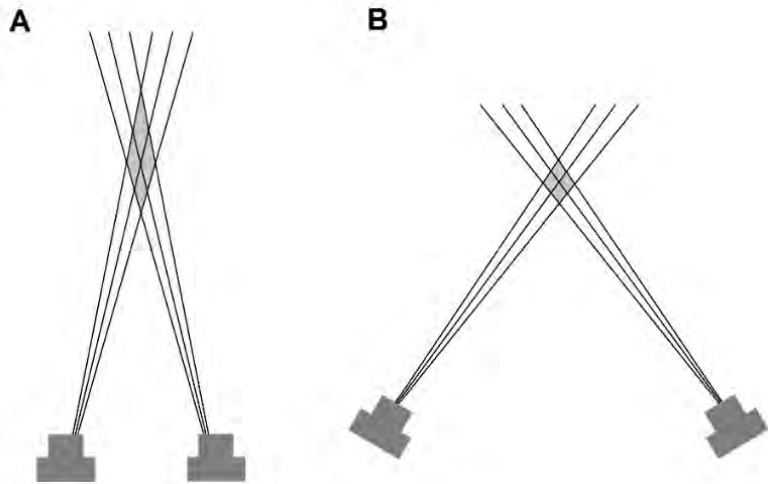


Figura 2. Disposiciones fotográficas. La incertidumbre generada por los rayos homólogos puede observarse sombreada en gris. (A) Toma paralela. (B) Toma convergente.

6.2.4. Procesado fotogramétrico SfM

En esta sección, se describen los pasos de procesado fotogramétrico en cada opción de *software* estudiado.

6.2.4.1 Agisoft PhotoScan.

La primera etapa en este *software* trata de realizar la alineación de las cámaras. Las imágenes *JPEG* se cargan, y el *software* emplea un algoritmo *SIFT* para buscar puntos característicos de las imágenes (*Key Points*), posteriormente busca sus coincidencias con otras imágenes (*Tie Points*) y a partir de dicha relación calcula las posiciones de las cámaras (Figura 3). En este paso, *PhotoScan* permite la selección de diferentes grados de precisión. En el estudio, se utilizó una “precisión alta” en los parámetros de configuración del procesado,

lo cual emplea el tamaño de la foto original sin aplicar reducción alguna. En la configuración avanzada, el límite de puntos clave (*Key Points limit*) indica el límite superior de los puntos característicos en cada imagen que se tendrá en cuenta durante la etapa de procesamiento inicial. El parámetro límite de punto de enlace (*Tie Points limit*) determina el número de puntos de cada imagen que se considerarán para el cálculo del posicionamiento de las cámaras a partir del algoritmo *Bundler*. En total, se utilizaron 40,000 como límite de puntos clave y 1,000 como límite de puntos de enlace.

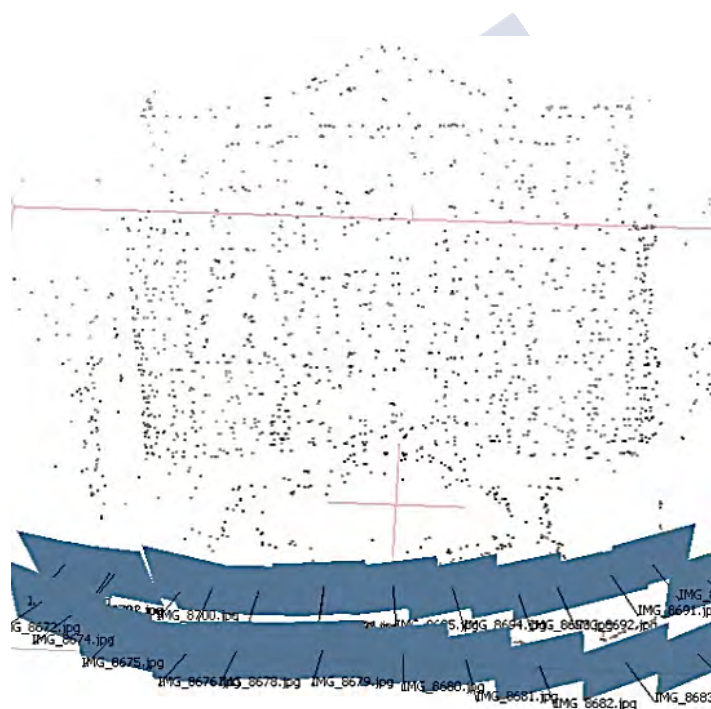


Figura 3. Orientación de tomas y nube de puntos dispersa. Agisoft *PhotoScan*.



Figura 4. Nube de puntos 3D texturizada obtenida a partir de un procesado de calidad alta y un filtrado de profundidad agresivo. Agisoft *PhotoScan*.

La toma fotográfica se realizó con enfoque automático, lo que resultó en pequeñas variaciones individuales en los parámetros de orientación interna de cada imagen. Para el cálculo inicial, el *software* establece parámetros de orientación internos comunes predeterminados para todas las fotos agrupadas según sus datos *EXIF*. Sin embargo, en el menú de calibración, estos grupos se pueden separar y los parámetros internos se pueden volver a optimizar individualmente para cada imagen. Posteriormente, se introdujeron 6 *GCP* medidos con la estación total y se realizó una transformación de similitud (*Helmert*). De esta manera, el modelo 3D se puede escalar y orientar correctamente. Los 17 *CPs* restantes se ingresaron al final del proceso para evaluar la precisión del modelo.

Después de la optimización de la calibración y la transformación *Helmert*, se procesó la nube de puntos densa. En este paso, se probaron diversas calidades de procesamiento, que incluyen calidad media (tamaño 1/4), baja calidad (tamaño 1/8) y calidad alta, que se refiere al procesamiento con la resolución de la foto original. El filtrado de profundidad se puede utilizar en esta etapa de procesamiento. En las opciones avanzadas, es posible elegir entre filtros deshabilitados, moderados o agresivos, estas opciones son también testeadas en este estudio. El procesamiento se ejecuta, proporcionando una nube de puntos con textura 3D (Figura 4) al final del mismo.

Posteriormente, el *software* genera una malla triangular a partir de la nube de puntos obtenida en el paso anterior. Los parámetros de reconstrucción de la malla se pueden seleccionar en el cuadro de diálogo. En este caso de modelados de fachadas, se debe utilizar un tipo de superficie arbitraria. Se reconstruyó una textura en modo genérico y el modelo se exportó al formato *Wavefront* (.obj).

Para obtener la vista frontal, se definió un plano de proyección utilizando *GCP* como marcadores, como se muestra en la Figura 5. Se seleccionaron tres puntos en el modelo 3D para formar los ejes del plano en el que se obtendrá la vista ortogonal. En este caso, los números de punto 17 y 4 definen el eje horizontal, y los puntos 20 y 4 definen el eje vertical.

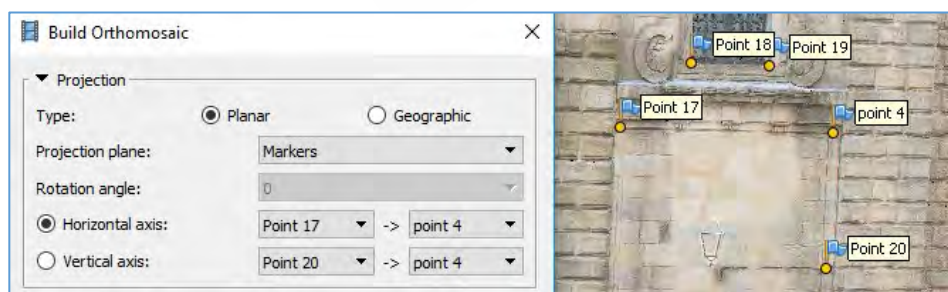
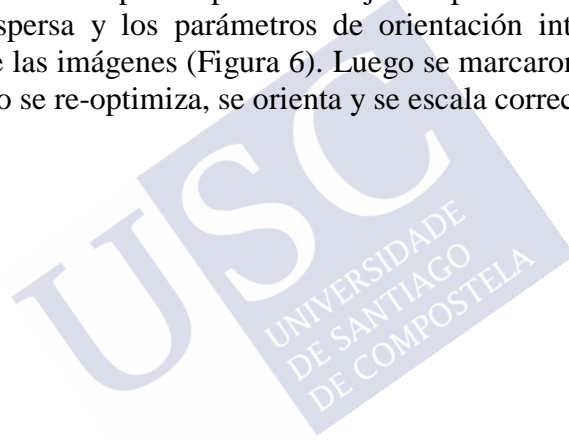


Figura 5. Procesado del ortomosaico con Agisoft *PhotoScan*. (Izq) Menú de configuración de procesamiento del ortomosaico. (Der) Marcadores utilizados para definir los ejes del plano de proyección.

6.2.4.2 Pix4D Mapper

La primera etapa en este *software* es la selección de un sistema de referencia de puntos de control y el tipo de proyecto. En este caso, se usó un sistema de coordenadas arbitrarias para la salida, y se seleccionó un modelo 3D como se recomienda para la construcción de trabajos de tipo fachada. La configuración del proceso inicial permite seleccionar la configuración de búsqueda de coincidencia. Para trabajar con los mismos parámetros que en *Agisoft PhotoScan*, se seleccionaron el tamaño de la imagen original y 40,000 puntos clave coincidentes. Los parámetros de configuración restantes se conservaron de forma predeterminada. El primer proceso se ejecutó para obtener una nube de puntos dispersa y los parámetros de orientación interna y externa relativa de las imágenes (Figura 6). Luego se marcaron los 6 *GCPs*, y el proyecto se re-optimiza, se orienta y se escala correctamente.



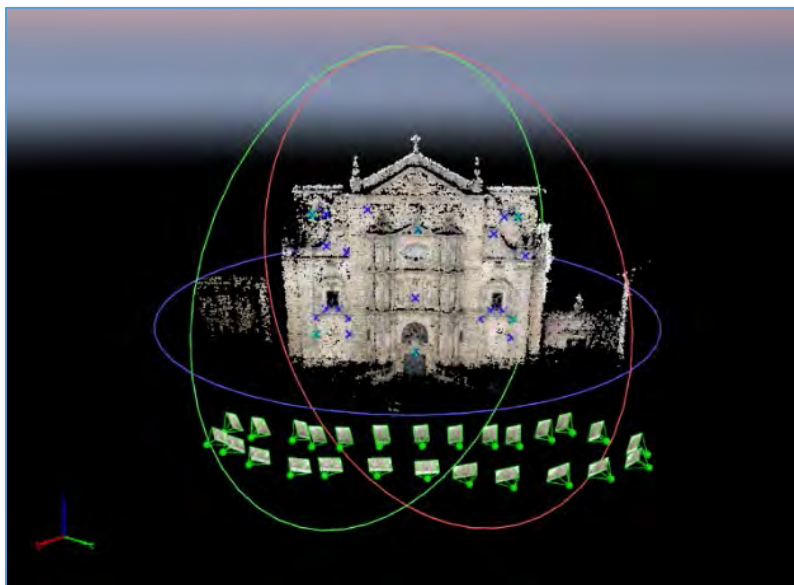


Figura 6. Orientación de tomas y nube de puntos dispersa.
Pix4D.

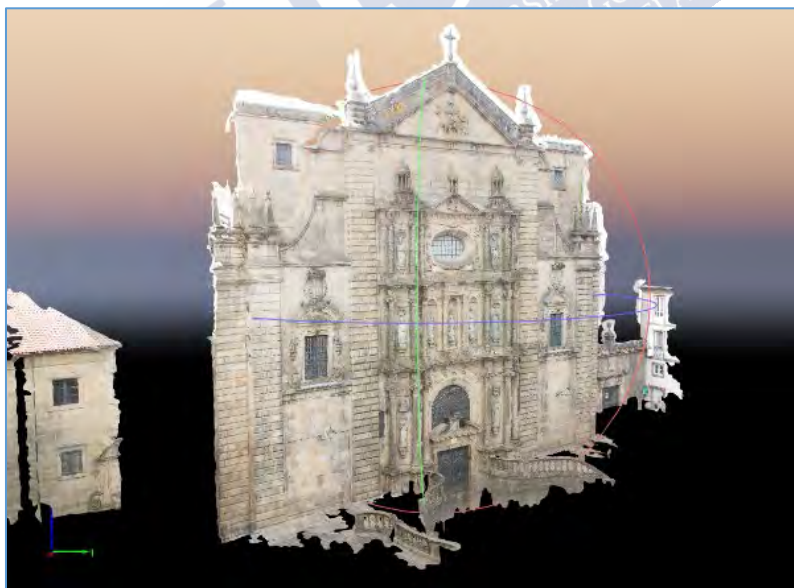


Figura 7. Malla de triángulos texturizada con calidad de procesado
"alta" y filtrado de profundidad activado. *Pix4D.*

La segunda configuración del proceso permite seleccionar la nube de puntos y la configuración de procesado de la malla. Nuevamente, se seleccionó el tamaño original para esta etapa y los parámetros restantes se conservaron de manera predeterminada. El segundo proceso, el procesado de la nube de puntos y la malla, se ejecuta y produciendo una nube de puntos densa y una malla triangular (Figura 7) la cual es guardada automáticamente en el directorio del proyecto en formato *Wavefront* (obj). El segundo procesado se repite con todos los filtros de profundidad desactivados para evaluar la eficiencia de los mismos.

La herramienta de generación de ortoplanos (Figura 8), permite definir el plano sobre el que se obtiene la ortofoto. En este caso se configuró para obtener la vista frontal de la fachada. Al final del proceso, los *CPs* restantes se introducen para evaluar la precisión del modelo.

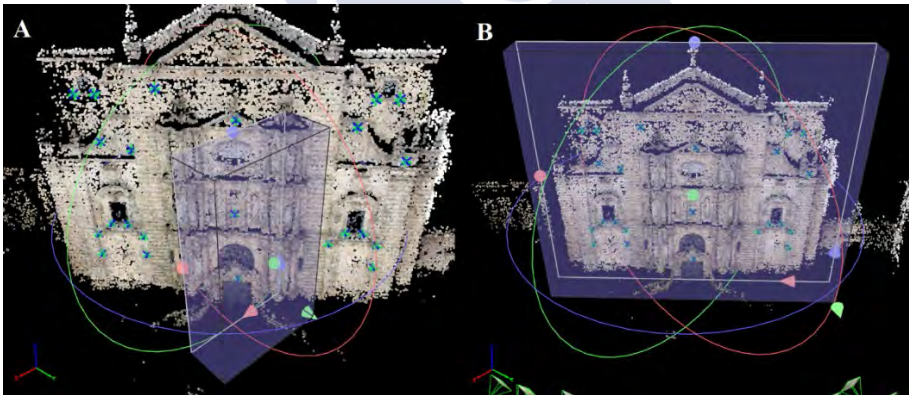


Figura 8. Configuración del ortoplano. (A) Ortoplano por defecto. (B) Ortoplano alineado.

6.2.4.3 Autodesk Remake

En este *software*, la única opción configurable es la calidad del procesado; es más simple pero mucho menos configurable que *PhotoScan* y *Pix4D*. En este caso, se eligió la calidad más alta posible. El flujo de trabajo se describe en la Figura 9. El procesado se realiza automáticamente mediante computación *SfM* “en la nube”.

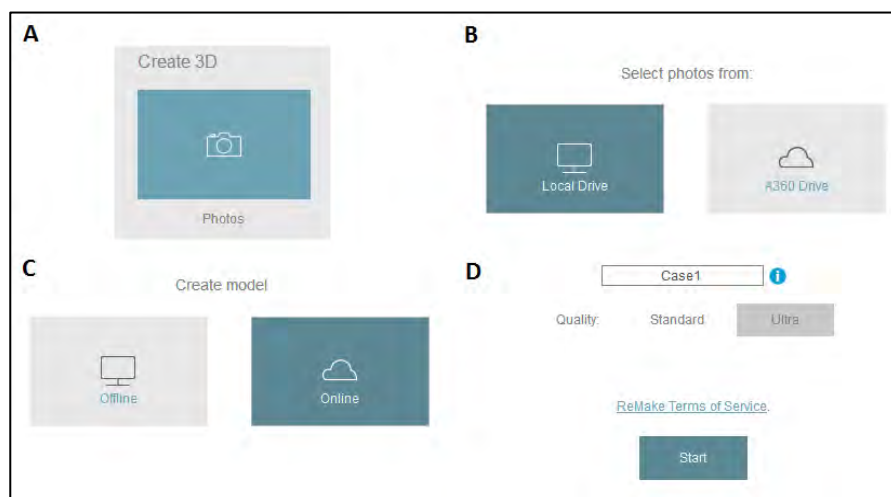


Figura 9. Etapas del procesado con *Autodesk Remake*. (A) Carga de imágenes. (B) Selección del directorio. (C) Selección del modo de procesado. (D) Selección de calidad de procesado.

Cuando se completa el procesado, el *software* permite descargar el modelo 3D en formato RCM (el formato nativo de *Autodesk Remake*). Varias herramientas internas permiten la edición modelo. Como se muestra en la Figura 10, para orientar y escalar el modelo de *Remake*, se introducen los *GCPs* para calcular una transformación *Helmert* que escala y coloca el modelo en la orientación correcta. Después de la transformación, los puntos CP se marcaron para evaluar la precisión del modelo. Finalmente, el modelo 3D se exportó en un formato *Wavefront* (.obj) (Figura 11).

COMPARACIÓN DE SOFTWARE DESKTOP PROFESIONAL Y SOFTWARE GRATUITO CLOUD COMPUTING EN EL MODELADO 3D DE EDIFICIOS HISTÓRICOS: MONASTERIO DE SAN MARTÍN PINARIO



Figura 10. Configuración del sistema de coordenadas en Autodesk Remake a partir de GCPs.



Figura 11. Malla de triángulos texturizada obtenida en Autodesk Remake.

No es posible obtener ortofotos a partir de este *software*. Por lo tanto, *Meshlab* fue utilizado con este propósito. Se realizó una rotación en el eje Z para ubicar el plano de la fachada en la perspectiva ortogonal (Figuras 12-A y 12-B), permitiendo que la vista frontal del modelo se pueda obtener a partir de las vistas predefinidas (Figura 12-C).



Figura 12. Rotación del modelo 3D de *Remake* en *MeshLab*. (A) Orientación original. (B) Orientación después de la rotación sobre el eje Z. (C) Vista frontal del modelo 3D.

6.2.5. Digitalización vectorial

Las ortofotos contienen información completa sobre las fachadas pero en un formato ráster. Existen dos métodos principalmente para vectorizar esta información: la digitalización de las entidades características en el *software* CAD sobre la ortofoto, o la digitalización directa a través del *software* fotogramétrico. *PhotoScan* y *Pix4D* permite una digitalización de modo intuitivo de las entidades vectoriales sobre el modelo 3D en formato compatible con BIM (Figura 13). *Autodesk Remake* no permite esta opción; por lo tanto, un *software* externo debe ser utilizado para la vectorización.



Figura 13. Ejemplo de vectorización BIM en Pix4D.

6.2.6. Comparación de resultados

En primer lugar, se evalúan los resultados del procesado, para lo cual se analizan el número de puntos y triángulos obtenidos, la densidad de puntos por m^2 , el tiempo empleado y la relación entre estos dos últimos parámetros.

Para evaluar la precisión geométrica, se introducen 6 *GCPs* en la etapa de procesado con todas las opciones de *software* testeadas, como se señala anteriormente, garantizando que los modelos 3D se encuentran en el mismo sistema de referencia. Los restantes puntos de coordenadas conocidas, un total de 17 *CPs*, se introducen posteriormente sin influencia en la calidad del procesado. Estas coordenadas se compararon directamente con respecto a las coordenadas consideradas reales obtenidas con la estación total,

permitiendo hallar los valores de error en cada punto de control. La Figura 14 presenta el menú de administración de *GCPs* y *CPs* en *Remake*. En todas las opciones de *software*, se utilizan los mismos puntos de chequeo marcados sobre la malla 3D, obteniendo los valores de la precisión del producto final.

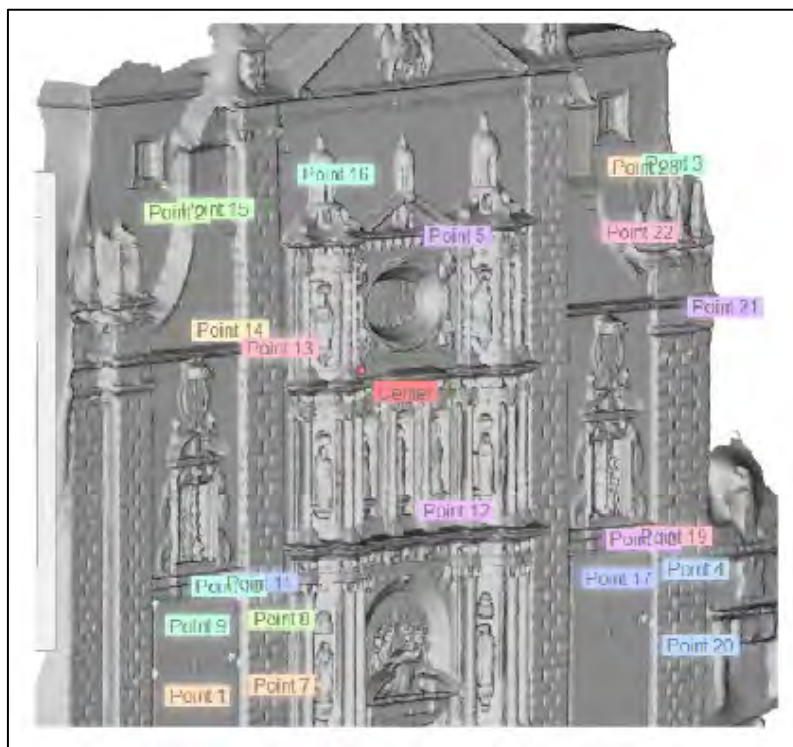


Figura 14. Análisis de precisión, a partir de *Check Points* (*CPs*) en *Remake*.

En tercer lugar, se analizaron los resultados visuales, incluida la calidad de la ortofoto y la textura, que se evaluaron mediante comparación visual.

Finalmente, en base a la opinión de técnicos fotogramétricos, se evaluó la utilidad operacional del *software*, analizando las ventajas y

desventajas del *software* de computación de escritorio frente al de computación en la nube, así como entre los dos *software* de escritorio testeados.

6.3. Discusión de resultados.

6.3.1. Resultados del procesado SfM

Pix4D y *PhotoScan* pueden generar nubes de puntos de alta densidad en sus opciones de procesado de alta calidad como se muestra en la Tabla 1. *Autodesk Remake* produce nubes de puntos de resolución más baja, aunque la resolución es suficiente para las mediciones de fachada. Los tiempos de procesado para el *software* de escritorio fueron sustancialmente más bajos en comparación con los del *software* de computación “en la nube”. Los tiempos de procesado del *software* de escritorio corresponden a la potencia de la computadora utilizada.

TABLA 1: Resultados de la etapa de procesado en *PhotoScan*, *Pix4D* y *Remake*.

Software	Config. del procesado de la nube de puntos	Número de puntos obtenido	Densidad de la nube puntos/m ²	Nº de triángulos de la malla	Tiempo total de procesado	Puntos por tiempo de procesado
<i>PhotoScan</i>	Alta	38.885.878	30.864	86.833.482	3h 26 min.	188.766
	Media	2.816.435	1.708	6.909.440	14 min.	201.174
	Baja	555.418	337	1.106.545	8 min.	69.427
<i>Pix4D</i>	Alta	39.944.546	24.379	Lim. a 10 M	2 h 51 min.	233.594
	Media	9.310.279	5.646	Lim. a 10 M	52 min.	79.044
	Baja	632.752	384	1.261.948	25 min.	25.310
<i>Remake</i>	Alta	937.111	568	1.659.497	60 min.	15.619

En la Figura 15 se presentan las relaciones entre la cantidad de puntos y el tiempo de procesado en todas las opciones de calidad analizadas del escritorio y del *software* de computación “en la nube”.

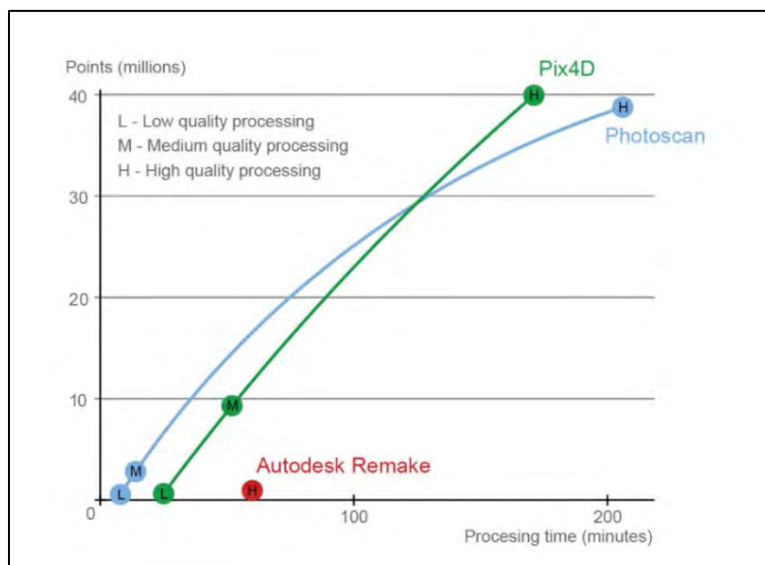


Figura 15. Gráfica del rendimiento de *PhotoScan*, *Pix4D*, y *Autodesk Remake*.

La Figura 16 presenta los resultados del procesado de *PhotoScan* sin filtros (Figura 16-A), con un filtro moderado (Figura 16-B) y con un filtro agresivo (Figura 16-C). Incluso el filtro agresivo genera una cantidad considerable de ruido. Este ruido se debe principalmente al color de fondo blanco del cielo en las fotos. Este problema podría haberse resuelto utilizando máscaras para este fondo.



Figura 16. Opciones de filtros de profundidad en *PhotoScan*. (A) Desactivado. (B) Moderado. (C) Agresivo.

En contraste con *PhotoScan* (Figura 17-A), tanto *Remake* (Figura 17-B) como *Pix4D* (Figura 17-C) generaron modelos con poco ruido.



Figura 17. Filtrados de profundidad en el *software* estudiado. (A) *PhotoScan* con filtrado agresivo. (B) *Pix4D* con filtrado activo. (C) *Remake*, no permite configuración del filtrado.

A partir de este punto el análisis hace referencia al procesado de mayor calidad y los resultados de filtrado más agresivos en ambas opciones del *software* de escritorio.

6.3.2. Calidad geométrica y análisis de precisión

El modelo obtenido utilizando *Remake*, aunque con menos triángulos, muestra una calidad geométrica similar a la de los modelos de *PhotoScan* y *Pix4D* de alta calidad en todos los tipos de superficies. La Figura 18, muestra que en la malla obtenida en *Remake*, los vértices no están distribuidos homogéneamente como en *Pix4D* o *PhotoScan*, pero la malla se presenta como una alta densidad de vértices en zonas no planas. Esta distribución de vértices explica por qué se obtiene la alta definición con un número reducido de puntos. *Autodesk Remake* obtiene automáticamente modelos en los que las áreas planas tienen menos densidad de triángulos. Esta característica también es posible en el *software* de escritorio si se realiza una reducción de la malla con la herramienta de reducción. Esta es una opción interesante porque agiliza el uso del modelo. En los otros tipos de geometría, como los salientes de las ventanas o en áreas de ornamentación altamente detallada, los resultados son similares en todos los programas testeados.



Figura 18. Malla triangular texturizada obtenida a partir de Remake. Calidad alta.

La Figura 19 presenta capturas de las mallas 3D obtenidas en *PhotoScan* (Figura 19-A), *Pix4D* (Figura 19-B) y *Remake* (Figura 19-C) en las mejores calidades.



Figura 19. Mallas 3D. (A) *PhotoScan*. (B) *Pix4D*. (C) *Remake*.

La Tabla 2 presenta los resultados de la evaluación de la precisión de cada punto medido y el error medio calculado para cada paquete de *software* analizado. Los valores de error se calcularon como el promedio de las diferencias entre las coordenadas de los puntos medidos con la estación total en las fachadas y los obtenidos en los

modelos. Teniendo en cuenta que existe incertidumbre al marcar puntos en el modelo, los resultados de los tres paquetes de *software* en términos de precisión pueden considerarse idénticos. El error más alto en el modelo de cada paquete de *software* está escrito en negrita y es inferior a 35 mm en todos los casos.

Tabla 2. Resultado del análisis de precisión (errores expresados en metros).

	Point	<i>PhotoScan</i>	<i>Pix4D</i>	<i>Remake</i>
Check Points (CPs)	1	0.025	0.022	0.024
	2	0.013	0.013	0.012
	3	0.018	0.017	0.023
	4	0.02	0.017	0.021
	5	0.017	0.019	0.011
	6	0.005	0.012	0.014
	7	0.035	0.022	0.015
	8	0.021	0.016	0.020
	9	0.008	0.009	0.029
	10	0.021	0.021	0.012
	11	0.015	0.015	0.009
	12	0.013	0.012	0.016
	13	0.014	0.011	0.012
	14	0.01	0.005	0.005
	15	0.011	0.012	0.011
	16	0.016	0.024	0.020
	17	0.019	0.008	0.010
	Media de error	0.017	0.015	0.016
	Desv. Estándar	0.00701	0.0054	0.0063

6.3.3. Calidad visual

Los modelos 3D texturizados obtenidos en *Remake* (Figura 20-C) son visualmente similares a los obtenidos en *PIX4D* (Figura 20-B) y *PhotoScan* (Figura 20-A) como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Modelos 3D texturizados. (A) *PhotoScan*. (B) *Pix4D*. (C) *Remake*.

La Figura 21 muestra las ortofotos obtenidas en cada paquete de *software*. Los resultados obtenidos en *PhotoScan* (Figura 21-A) son ligeramente mejores que los obtenidos en *PIX4D* (Figura 21-B), esto se debe principalmente a la diferencia entre ambos en el modo de procesado de dicha ortofoto. La calidad de la ortofoto obtenida con *Remake* (Figura 21-C) es notablemente peor debido a las limitaciones del *software*. En lugar de un mosaico de imágenes corregidas por distorsión, la ortofoto es una vista ortogonal del modelo texturizado generado en el *software Meshlab*.



Figura 21. Ortoimágenes. (A) *PhotoScan*. (B) *Pix4D*. (C) *Remake*.

6.3.4. Facilidad de uso y opciones de exportación

En esta sección se describe, la facilidad de uso relativa de cada paquete de *software* junto con otras consideraciones globales con respecto a su uso como herramienta de procesado, ventajas y limitaciones y opciones de exportación.

6.3.4.1 *Software* de computación local vs computación “en la nube”.

El flujo de trabajo de *Remake* es muy simple, apenas es necesario un aprendizaje previo para ejecutar un procesado. En *PhotoScan* y *Pix4D*, el flujo de trabajo es más complejo, pero también tiene un nivel de automatización muy alto. Por lo tanto, 3-4 semanas de aprendizaje podría ser suficiente para su manejo general. *PhotoScan* y *Pix4D* tienen más opciones de procesado que *Remake*. Al emplear puntos de referencia con coordenadas conocidas en el elemento, el *software* profesional puede calcular un ajuste óptimo de la malla que puede ser altamente preciso si se ingresan muchos puntos. Tanto *Pix4D* como *Agisoft PhotoScan* permiten la generación y exportación de entidades vectoriales 3D. Esta digitalización permite exportar información a formatos compatibles con el *software* BIM. El *software* profesional de computación local, también ofrece más opciones de exportación en 2D y 3D que el *software cloud computing* analizado, por ejemplo, ortofotos o PDFs en 3D.

Remake es un paquete de *software* de bajo coste con un flujo de trabajo simple, que permite a cualquier usuario crear modelos fotorrealistas en 3D con una cámara convencional y un PC de usuario medio. El *software Remake* proporciona un proceso automatizado en el que la escena se reconstruye utilizando el servidor. Este *software*, también incluye herramientas de edición intuitivas para la reparación de errores, la impresión 3D y la exportación de video. En este caso de estudio, los resultados de precisión de *Remake* fueron similares a los obtenidos con *software* profesional. Sin embargo, *Remake* tiene varias limitaciones que pueden ofrecer malos resultados en otros tipos de fachadas. El usuario tiene un número limitado de imágenes (250 en este caso), y la densidad de la malla es limitada, lo que puede ser un

problema para modelar fachadas más ornamentadas. Además, pocos parámetros de proceso pueden ser controlados y en el caso de una orientación automática incorrecta, el programa no ofrece la opción de identificación manual de puntos de paso que corrijan la misma. No permite la digitalización directamente en la malla, pero se puede utilizar un *software* externo para realizar esta tarea. La Figura 22 presenta el resultado de la digitalización vectorial en *software* CAD superpuesta al alzado obtenido en *Meshlab* a partir del modelo 3D de *Remake*.

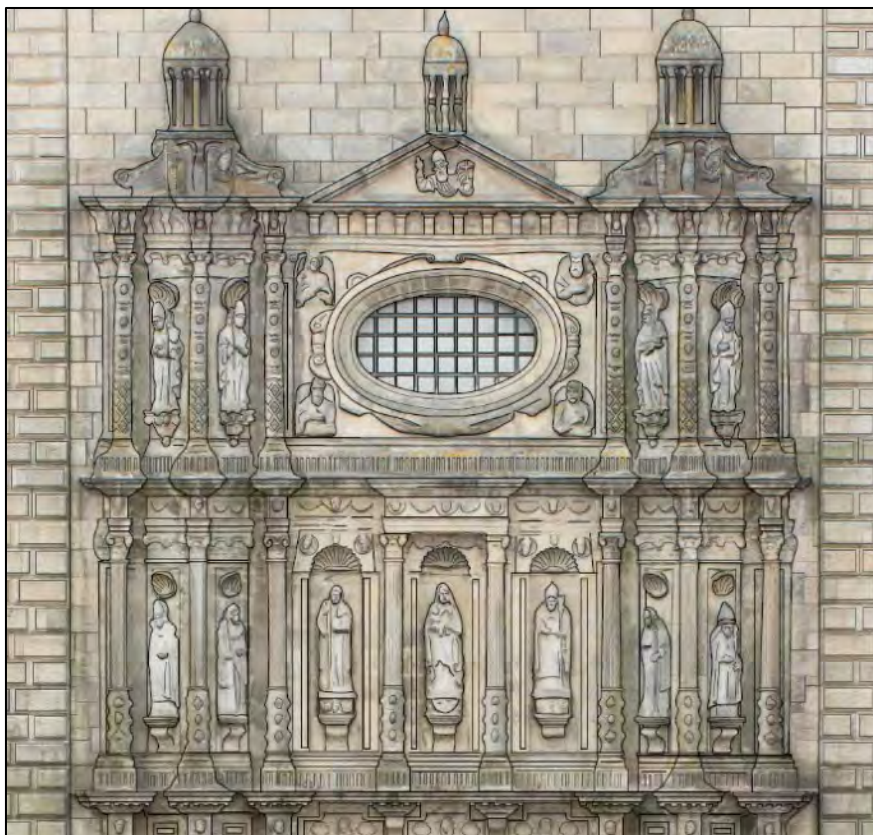


Figura 22. Ortofoto y digitalización vectorial a partir del modelo obtenido en *Remake*.

Aunque la fotogrametría permite obtener productos más avanzados, puede ser útil simplemente como herramienta de recopilación de datos métricos para profesionales de la arquitectura y el patrimonio. El *software* de computación en la nube, es una gran opción en estos casos por su facilidad de uso como se muestra en la Figura 23.

Solo se necesita una distancia de referencia para escalar el modelo y una colección de fotos para obtener medidas de todos los elementos presentes en una fachada. El uso de métodos tradicionales o *software* de escritorio sería más lento, difícil y tedioso.

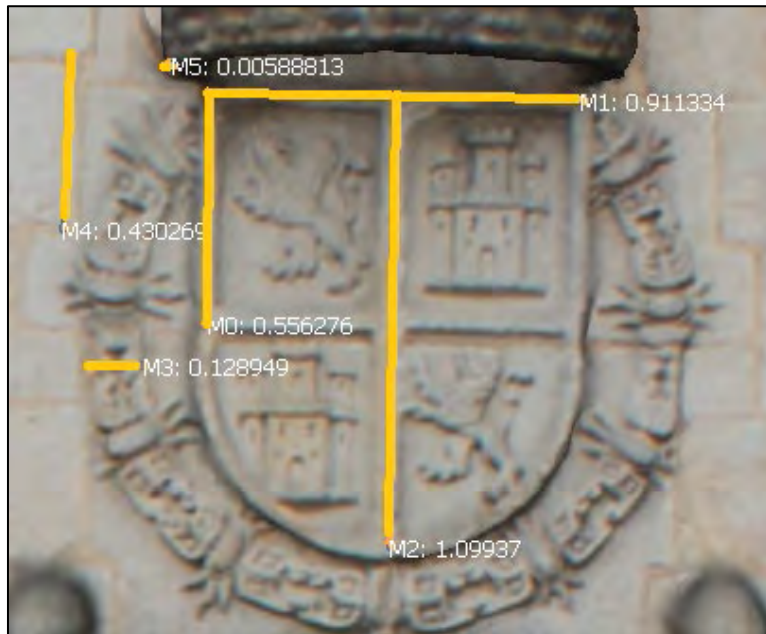


Figura 23. Múltiples mediciones individuales sobre un elemento de la fachada (metros).

Cabe señalar que la naturaleza en línea de las herramientas de computación “en la nube” dará lugar a actualizaciones periódicas no opcionales en los servicios de modelado 3D. Un ejemplo claro es *Autodesk Remake*, el cual sustituye a *123DCatch* en 2009. El programa

se convirtió más tarde en el servicio *Recap Photo* y, posteriormente, en *Project Memento*, que evolucionó a *Autodesk Memento*, que posteriormente pasó a llamarse *Autodesk Remake* y actualmente de nuevo *Autodesk Recap Photo*. Esta última evolución del *software* de procesamiento fotogramétrico de Autodesk puede incluso procesar trabajos aéreos. No obstante el cambio continuo de nombre y condiciones del servicio genera inseguridad técnica y confusión.

Los diferentes productos que se pueden obtener en el *software* descrito se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Opciones de exportación.

<i>Software</i>	Ortomosaico	PDF 3D	Vectorización BIM	Informe de procesado	Video
<i>PhotoScan</i>	Sí	Sí	Sí	Sí	No
<i>Pix4D</i>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
<i>Remake</i>	Proyección ortogonal del modelo texturizado	No	<i>Software</i> externo	No	Sí

6.3.4.2 Pix4D vs. PhotoScan

Pix4D tiene ciertas ventajas en comparación con *PhotoScan* en términos de facilidad de uso, gracias a una interfaz más intuitiva. Permite la posibilidad de exportar video, y un mayor número de opciones de visualización. El ruido de la nube de puntos es considerablemente menor que en *PhotoScan*. *Pix4D* ofrece diferentes configuraciones de visualización tanto para malla como para nubes de puntos. La Figura 24 presenta la nube de puntos obtenida en este *software* en el modo de visualización de altitud. No obstante, *PhotoScan* ofrece mejores resultados en la obtención ortofotos en alzado.

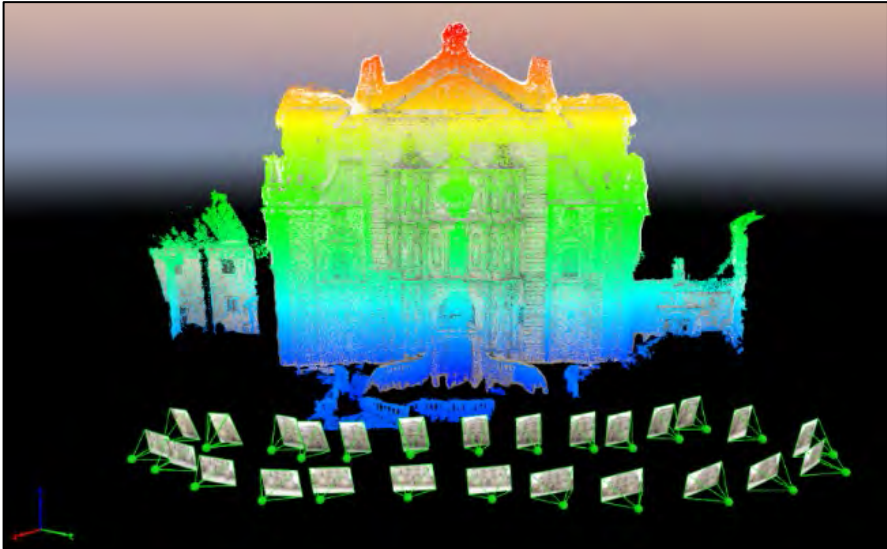


Figura 24. Nube de puntos con color por alturas.

6.4. Conclusiones.

La fotogrametría de corto alcance es una técnica interesante para obtener modelos 3D de edificios y ofrece numerosas vías de estudio en patrimonio y arquitectura, ya que solo una cámara y un instrumento de medición, como un flexómetro, son necesarios para la toma de datos. Tanto el *software* de escritorio como el de computación “en la nube” testeados, pueden producir resultados *precisos* como se demuestra en este estudio. Se espera que la progresión de los sensores, los algoritmos de cálculo y la computación en la nube, además de las actualizaciones continuas de los servicios web fotogramétricos, proporcionen herramientas de mayor potencial para los profesionales del patrimonio, permitiendo la capacidad de obtener medidas de manera confiable y simple, documentar texturas o formas complejas, mostrar visualizaciones atractivas o diseñar directamente sobre los modelos 3D de edificios existentes, entre otras opciones.

Los paquetes de *software* de computación “en la nube” y de escritorio ofrecen resultados similares en términos de precisión y

calidad visual. Por lo tanto, la computación “en la nube” es una opción interesante para los profesionales del patrimonio que no se han especializado en fotogrametría y que están buscando una buena relación entre precio, calidad y facilidad de uso en la adquisición de *software* fotogramétrico. Además, el *software* de computación “en la nube” tiene un flujo de trabajo simple, apenas es necesario un aprendizaje previo, y solo requieren equipos informáticos de nivel usuario. Los modelos de *Remake* obtienen una buena evaluación en las variables estudiadas por lo que el *software* obtiene un gran rendimiento.

El *software* profesional es una opción recomendada si se necesitan productos derivados, como ortofotos o directamente vectorizaciones BIM; sin embargo, estas funciones también se pueden obtener con *software* de computación “en la nube” mediante *software* externo. El análisis de los resultados del *software* de escritorio demuestra que tanto *Pix4D* como *PhotoScan* tienen un alto rendimiento. Sin embargo, algunas de las ventajas que ofrece *PhotoScan* se encuentran en la calidad geométrica y visual de los resultados, y las ventajas de *Pix4D* son la facilidad de uso y la amplia variedad de opciones visuales.

Como una limitación notable de la fotogrametría, en las áreas superiores de la fachada, ciertas partes ocultas no aparecen en el modelo, por lo que sería recomendable usar pértigas o drones para levantar la cámara y capturar información de estas áreas. Otra limitación podría ser el espacio disponible para la sesión de fotos, ya que el espacio de trabajo representa una importante desventaja. En este estudio, la fachada de piedra es un material perfectamente adaptado a esta prueba; Las líneas futuras de investigación deberían analizar el comportamiento de la computación “en la nube” en superficies más reflexivas, ya que el *software* no permite una configuración del procesado adaptada a dicha situación, lo que si sería posible en el *software* profesional.

7. CAPITULO III

COMPARACIÓN DE *TLS* Y FOTOGRAMETRÍA *SfM* PARA EL MODELADO 3D DE ARTE RUPESTRE Y LA APLICACIÓN DEL REALCE *RADIANCE SCALING SHADER* PARA LA DETECCIÓN DE GRABADOS

RESUMEN

El inventario geométrico y la documentación del arte rupestre presentan grandes desafíos debido a la gran cantidad de petroglifos existentes en el territorio, la distancia entre ellos, en muchos casos el estado de abandono de las áreas forestales, las limitaciones de acceso y las características geométricas de este patrimonio. La fotogrametría *Structure from Motion (SfM)* se posiciona como una técnica ideal para su documentación, pero esta técnica tiene una gran variabilidad en su metodología y coste de ejecución. En este estudio, se compara un método simple y eficaz basado en la fotogrametría *SfM* con *software* de computación “en la nube” de bajo coste con el uso de un escáner láser terrestre (*TLS*) para generar modelos 3D de petroglifos. La comparación se realiza en la documentación 3D del petroglifo de *O Castriño de Conxo* en Santiago de Compostela, España, y se extiende a dos experimentos prácticos en otros petroglifos. Las mallas se comparan mediante el análisis de criterios visuales, geométricos y operacionales y su grado de adaptación a la aplicación del renderizado de grabados *Radiance Scaling Shader*. Los resultados muestran que

con una metodología de fotogrametría *SfM* accesible a perfiles no expertos, es posible obtener mejores resultados en aspectos geométricos y visuales que los obtenidos con *TLS*, siendo estos válidos para un análisis detallado de arte rupestre y que por tanto, permite de un modo colaborativo una documentación masiva del fenómeno que no es posible exclusivamente por medios profesionales.



7.1. Introducción y objetivos

Los nuevos métodos de adquisición de datos geométricos están revolucionando las formas de documentar el patrimonio arqueológico (J.H. Chandler et al., 2005; Cirulis et al., 2015; Gonizzi Barsanti et al., 2013; Karsli et al., 2003; Simpson et al., 2004). Para representar con precisión la información de sitios complejos u objetos con irregularidades o curvaturas, es necesario construir nubes de puntos 3D de alta densidad. Actualmente, la fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*) (Remondino & El-Hakim, 2006), el láser escáner terrestre (*TLS*) (Altuntas et al., 2007) y la combinación de ambos (Al-kheder et al., 2009; Grussenmeyer et al., 2012; Guidi et al., 2004; Lambers et al., 2007; José Luis Lerma et al., 2010; Yastikli, 2007) se han establecido como las técnicas más utilizadas en la adquisición de nubes de puntos texturizados de alta precisión y resolución. Estas técnicas, que permiten la adquisición de modelos 3D de resultados métricos y fotorrealistas de alta calidad, representan una herramienta poderosa para la identificación, monitoreo, conservación y restauración de elementos del patrimonio (Campana & Remondino, 2008; Chiabrando et al., 2011; Martínez-Rodríguez et al., 2015).

El conjunto arqueológico gallego de arte rupestre es la expresión artística más significativa de las comunidades que habitaron estas tierras en la edad de bronce. Catalogados dentro de la familia de arte rupestre “Atlántico”, estos petroglifos tienen una fuerte personalidad que los hace reconocibles entre muchos otros. Considerando el número y la calidad de los diseños, el arte rupestre gallego es una de las manifestaciones culturales más importantes de este tipo en Europa (Bradley, 2002; Bradley et al., 1994; Bradley & Fábregas-Valcarce, 1998; Santos-Estévez, 2015). La documentación del fenómeno de los petroglifos gallegos es desafiante por sus características geométricas con grabados poco profundos, que tienden a ubicarse en las caras semi horizontales de afloramientos rocosos de poca altura, lo que los hace difíciles de apreciar bajo luz natural. Tradicionalmente, se han utilizado técnicas como el *Frotage* o el calco con plástico (Lewis-Williams & Pager, 1990; Medici & Rossi, 2015; Moneva Montero, 1993). Estas técnicas son lentas y tediosas, tienen un alto grado de

subjetividad y pueden dañar el soporte. Este complicado registro ha dado lugar a documentaciones e interpretaciones parciales del conjunto arqueológico, como se discute en (Rodríguez Rellán et al., 2018), donde se muestra que el territorio gallego tiene un número de petroglifos catalogados por encima de 3000 y que año tras año, este catálogo aumenta. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la única documentación existente es una descripción textual y su geolocalización aproximada, lo que conduce a una interpretación parcial del fenómeno. La documentación geométrica de todo el arte rupestre no es factible por razones técnicas y económicas, y al mismo tiempo, esta documentación es una tarea muy necesaria debido al alto riesgo de deterioro de este patrimonio que está totalmente expuesto a agentes externos. La colaboración social es la única forma de documentar geométricamente este fenómeno cultural de manera masiva. Por esta razón, es de vital importancia que los agentes sociales conozcan y administren herramientas y técnicas cuyo uso para esta tarea sea ágil, simple, económico y efectivo.

La fotogrametría ha demostrado ser más adaptable a las particularidades de diferentes escenas, como se muestra en (Peña-Villasenín et al., 2017). Además, las principales ventajas de la fotogrametría se presentan en el tiempo y coste de ejecución; Por lo tanto, es la técnica más apropiada para esta documentación masiva. Sin embargo, estas variables empeoran si se utilizan en el proceso *software* profesional y puntos de control en tierra (*GCP*). Por otro lado, artículos como (Ortiz-Sanz et al., 2011) describen metodologías simples que también resultan ser precisas para el estudio del arte rupestre. Por lo tanto, la fotogrametría se puede ejecutar con diferentes metodologías de recopilación de datos, entre las cuales, independientemente de la calidad de los resultados, hay diferencias notables de rendimiento en tiempos y costes que cabe analizar.

Con respecto a la *TLS*, la operatividad, por ejemplo, en condiciones de poca iluminación, es superior a la de la fotogrametría *SfM*. Sin embargo, a pesar de los beneficios del *TLS* en la documentación del patrimonio arqueológico, el tiempo requerido para el trabajo de campo, el coste del equipo, los problemas en el transporte y la complejidad de la administración de datos, a menudo conducen a

graves problemas de practicidad en lugares arqueológicos (Campana & Remondino, 2008). Además, la combinación de escaneos introduce inconsistencias en la orientación de los mismos, y en la mayoría de los *TLS* no se especifica correctamente la precisión que obtienen (Boehler & Marbs, 2004). Estudios anteriores han comparado la fotogrametría *SfM* y el *TLS*, normalmente en condiciones óptimas para registrar el patrimonio cultural, con resultados similares para ambos (D.D. Lichti, S. J. Gordon, M. P. Stewart, J. Franke, 2002). Otras comparaciones como en (Baltsavias, 1999; Grussenmeyer et al., 2008) han demostrado que la elección óptima de la técnica depende del objeto a modelar y las condiciones del trabajo, que requieren una evaluación de la eficiencia de ambas opciones en cada caso particular: por ejemplo, en el modelado de petroglifos, donde existen factores determinantes en la aplicación de ambas técnicas, como la geometría de la roca, la vegetación del entorno y las limitaciones de acceso.

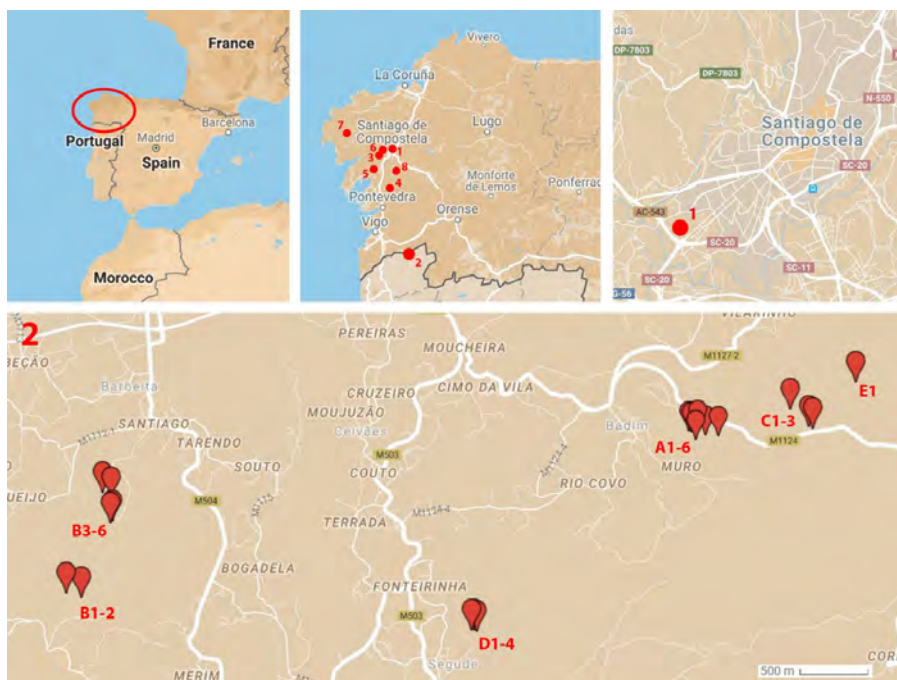
Existen otras comparaciones entre *TLS* y fotogrametría, como en los estudios (Guarnieri et al., 2013; Lato et al., 2015; López-Mencheró Bendicho et al., 2017; Skarlatos & Kiparissi, 2012; Wilkinson et al., 2016), pero la metodología de fotogrametría utilizada en ellos es demasiado compleja para perfiles no expertos porque requiere *GCP* (que implica el uso de dispositivos topográficos y *software* de escritorio) o el uso de otros dispositivos como pértigas, drones o cámaras de alto coste. Por este motivo, este caso de estudio compara los resultados de una documentación compleja utilizando *TLS* con la aplicación de una metodología simple de fotogrametría *SfM*. Además, se verifican otros flujos de trabajo fotogramétricos con *software* profesional y uso de *GCP* para evaluar la diferencia en el consumo de tiempo entre estas metodologías fotogramétricas. Se analizan diferentes variables como el coste, el trabajo de campo, el rendimiento del procesado, la calidad geométrica y visual y el potencial de detección de los grabados del *TLS* y la fotogrametría simple. Además, con el objetivo de extrapolar los resultados y evaluar la eficiencia real y la simplicidad de la técnica, se llevan a cabo dos experimentos prácticos en los que se utiliza esta metodología simple para otros ejemplos de arte rupestre.

7.2. Metodología

Esta sección describe el objeto de estudio, la metodología utilizada en el procesado de fotogrametría *TLS* y *SfM*, el método de comparación y los dos experimentos en otros ejemplos de arte rupestre.

7.2.1. Caso de estudio: *O Castriño de Conxo*

El petroglifo de *O Castriño de Conxo* se encuentra en Santiago de Compostela, Galicia, en el noroeste de España. Es uno de los “paneles de armas” más importantes (La Peña-Santos, 1969) dentro del grupo de arte rupestre “Atlántico”. Además de las particularidades generales de este tipo de patrimonio, varias condiciones complican la documentación completa de este elemento, como por ejemplo, la suavidad de los grabados en forma de “U” que tienen de 2 a 3 cm de ancho por 0.5 a 1 cm de profundidad, las grandes dimensiones y la pendiente de la roca (aproximadamente 8.20×2.80 m), la existencia de valla metálica en el extremo sur del afloramiento y la existencia de una importante vegetación en el entorno que limita considerablemente el espacio de trabajo, una situación que se produce en la mayoría de los petroglifos gallegos, lo que dificulta la aplicación de ambas técnicas y justifica la elección de este petroglifo como representativo. La ubicación de este elemento se muestra en la Figura 1 (Punto 1).



Localización de los ejemplos de arte rupestre. (1) *O Castríño de Conxo*, en Santiago de Compostela. (2) *Monção*, en Portugal donde, (A1-6) *Terreiros*, (B1-2) *Nossa Senhora da Assunção*, (C1-3) *Badim*, (D1-4) *Segade* y (E1) *Sá*. (3) *Monte Castelo*, en Ames. (4) *Pedra da Grada*, en Moraña. (5) *O Pumariño*, en Brión. (6) *Cortellos*, en Santiago de Compostela. (7) *Pedrouzos*, en Vimianzo. (8) *Chan das Lamas*, en A Estrada.

7.2.2. Láser escáner terrestre

Desde el desarrollo del primer *TLS* en 1999, esta tecnología ha sido testigo de una fase de desarrollo, crecimiento y expansión continua en múltiples campos. En este método de modelado masivo (Beraldin et al., 2000; Blais, 2004), se utilizan sensores activos que capturan directamente la información geométrica 3D del objeto mediante el uso de láser o luz estructurada, como se muestra en (McPherron et al., 2009). Estos dispositivos recuperan información en 3D aplicando diferentes principios de medición como la triangulación, el tiempo de vuelo o la amplitud modular. Son sistemas robustos y costosos que presentan problemas de manejo complejos, presentando, en ocasiones,

problemas graves de operatividad para la documentación de arte rupestre, o son demasiado costosos para la documentación de todos los elementos catalogados en tareas de prospección (El-Hakim et al., 2005).

7.2.2.1 Toma de datos

El afloramiento rocoso donde se ubica el petroglifo fue escaneado utilizando un escáner *Focus3D X 130* de la empresa FARO (Florida, EE. UU.). Este *TLS* es un escáner de 360° con una precisión de 2 mm y un rango de 0,6 a 130 m. La toma de datos se realizó a aproximadamente 1,5 a 2 m de la roca en cinco posiciones. Estas posiciones se eligieron adaptándose a las limitaciones y condiciones geométricas para minimizar las partes ocultas. Se utilizaron cuatro esferas de referencia para la alineación relativa de los escaneos. Las posiciones de los puntos de escaneo y esferas se muestran en la Figura 2-A.

7.2.2.2 Procesado

El procesado y alineación de cada escaneo se realizó con el *software* FARO SCENE, que procesa los datos obtenidos directamente del *TLS*. El *software* detecta automáticamente las esferas de referencia y alinea y unifica el conjunto de datos. Una vez que se obtiene la nube de puntos definitiva, se refina y se exporta en el formato PTX. Posteriormente, el *software* Geomagic Studio importa el archivo de nube de puntos para generar la malla triangular. Los pequeños orificios de la malla en áreas donde las protuberancias de la roca no permiten un escaneo correcto se rellenan para obtener una rejilla homogénea. Además, para trabajar de manera eficiente, el modelo se simplifica a 8 millones de triángulos.

7.2.3. Fotogrametría SfM

La fotogrametría es una técnica con una larga trayectoria que, paralelamente a la expansión del escáner láser, sufrió una importante evolución que propició una creciente popularidad en sectores como el

de la arqueología (De Reu et al., 2014) y particularmente para la documentación de arte rupestre (Bea & Angás, 2017; Jim H. Chandler et al., 2007; Ortiz-Sanz et al., 2010). El desarrollo de algoritmos de extracción de datos 3D basados en imágenes (Jim Chandler, 1999; Lane et al., 2000), y los métodos de calibración para cámaras no métricas. (Jh Chandler et al., 2005; S. Martínez, 2012) han contribuido a la expansión de *SfM*. Esta tecnología utiliza un proceso automatizado para obtener nubes de puntos, mallas triangulares y modelos 3D con textura, a partir de fotografías (Remondino & El-Hakim, 2006; Westoby et al., 2012).

El desarrollo de ciertos algoritmos, como los algoritmos de transformación de característica invariante de escala (*SIFT*) (Chandran et al., 1997; Keypoints & Lowe, 2004), el ajuste *Bundler* (Clarke & Fryer, 1998; Fraser, 2013; Snavely et al., 2008; Triggs et al., 2000) y los algoritmos *Clustering Views for Multi-view Stereo* (CMVS) y *Patch-based Multi-view Stereo* (PMVS) (Furukawa et al., 2010; Furukawa & Ponce, 2010) son factores notables en la evolución de esta técnica. *Software* de escritorio como *Eos Photomodeler* (Barazzetti et al., 2011), *Agisoft PhotoScan* (De Reu et al., 2013b) o *Pix4D Mapper* (Strecha et al., 2012) son las herramientas de *software* fotogramétricas más utilizadas por los profesionales. *Software* de código abierto, como *VisualSfm* (Remondino et al., 2012) también está disponible. Sin embargo, durante la última década, el uso de los recursos de computación “en la nube” ha aumentado y muchos servicios de procesamiento de imágenes se realizan en un servidor externo. Ejemplos de tales servicios son *ARC3D* (Tingdahl & Van Gool, 2011), *123DCatch* (Jim; Chandler & Fryer, 2013; Santagati & Inzerillo, 2013), el cual ha dejado de estar disponible, y *Autodesk Memento* (Johnson & Solis, 2016) (que es la versión beta de *Autodesk Remake* (Nikolov & Madsen, 2016), actualmente denominado *Autodesk Recap Photo* (2017). Incluso los teléfonos inteligentes modernos se pueden utilizar para tomar fotos y generar y visualizar modelos 3D en un solo dispositivo con aplicaciones como *SCANN3D* o *TRNIO*.

7.2.3.1 Toma fotográfica.

La toma fotográfica se realizó del modo más simple posible, utilizando una cámara convencional, en concreto una Olympus Pen Ep-1 con una longitud de focal fija de 14 mm, que equivale a 35 mm en el formato *Full Frame*. Se toman un total de 99 fotos (64 desde el exterior hacia el interior y 35 longitudinalmente al afloramiento, como se muestra en la Figura 2-B) la sensibilidad empleada fue *ISO 200*, una velocidad de obturación de 1/160 y una apertura de diafragma de 6.3. No se utilizó ningún trípode porque esto retrasa significativamente la toma y es un factor limitante en la elección de la disposición de las fotos. Se desactivaron todos los automatismos estabilizadores del objetivo, excepto el enfoque automático.

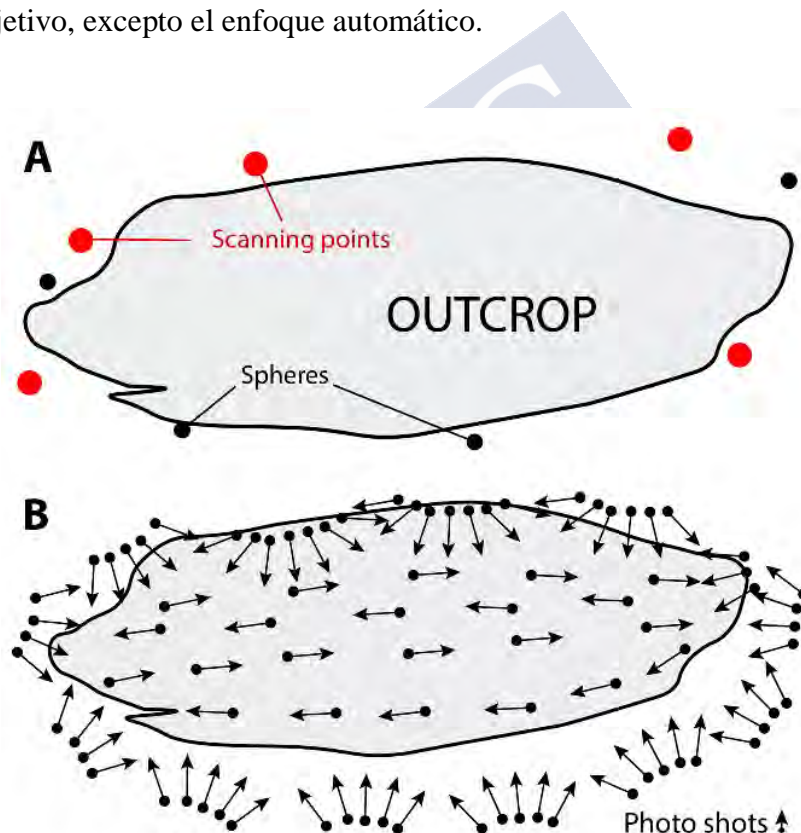


Figura 2. (A) Puntos de escaneo y esferas de referencia. (B) Disposición de tomas fotográficas.

Para la estabilización de las tomas, el único método utilizado fue la fijación al cuello con una correa en el momento de la captura. El único requisito en la toma fue cubrir toda la superficie de la roca a una distancia de aproximadamente 1,5 m desde el punto de toma con fotografías suficientemente solapadas.

Con el objetivo de evaluar el tiempo de trabajo de campo de esta tarea, se midieron los *GCP*, los cuales mejoran el ajuste fotogramétrico en el procesado con *software* profesional (*PhotoScan* y *Pix4D*); por lo tanto, antes de la toma, 10 dianas fueron colocados en la escena. Las coordenadas de estas se midieron con la estación total sin prisma *TOPCON GPT 7005*, con una precisión angular de 5" y una precisión de medición en distancias sin prisma de 5 mm + 2 ppm.

7.2.3.2 Procesado fotogramétrico.

Con la misma colección de imágenes, se realizan tres procesos fotogramétricos independientes para evaluar el tiempo de procesado de la fotogrametría profesional con el uso de *GCP* y *software* de escritorio, *Agisoft PhotoScan* y *Pix4D*; y una fotogrametría simple sin *GCP* y con el *software* de bajo coste y de computación "en la nube" *Autodesk Remake*.

En ambos programas de escritorio, el flujo de trabajo es similar. Las fotografías se importan y se realiza una primera orientación del conjunto de imágenes. A continuación, los puntos de control terrestre (*GCP*) se introducen para la georreferenciación y proporcionar precisión geométrica a la escena. Luego, la orientación de imágenes se reajusta y, finalmente, se procesan la nube de puntos densa y la malla triangular.

En *Autodesk Remake*, el flujo de trabajo presenta gran simpleza. El procesado se realiza en la nube, y el usuario puede cerrar el programa una vez que se complete la carga de las fotos. Cuando finaliza el este, se envía una notificación de mensaje de correo electrónico, y es posible descargar y visualizar la malla final en la aplicación. En este paso, la malla se puede escalar y orientar

simplemente basándose en una medición de referencia y una restricción de orientación por medio de una plomada y una brújula.

7.2.4. Comparación de resultados

El *TLS* y diferentes flujos de trabajo fotogramétricos fueron comparados. Para ello, se analizaron los costes, tiempos de trabajo y los resultados estadísticos de la nube de puntos y de la malla. Luego, se realizó una comparación entre la malla obtenida a través de *TLS* y la obtenida mediante la metodología de fotogrametría simple descrita. Se analizaron tres criterios: la precisión geométrica de la malla, la calidad de la textura y el potencial de detección y análisis de grabados.

Para el estudio de la precisión geométrica, los modelos fotogramétricos y el obtenido a partir de *TLS*, se importaron a *Geomagic Studio*. Los modelos se encuentran en diferentes sistemas de referencia, no obstante este *software* alinea las mallas mediante un proceso automatizado, mostrando los errores máximos, las medias, el error medio cuadrático (*RMS*) y los valores de desviación de dicha alineación. Además, de cara a evaluar no solo la precisión métrica si no la calidad geométrica de la malla, se analizó la presencia de huecos o inconsistencias en los modelos.

Para los criterios visuales, se analizó la calidad de la textura y el color de las mallas generadas mediante una comparación visual subjetiva.

Para evaluar el potencial de las tareas de detección y análisis de grabados, cabe señalar que aunque los modelos 3D de fotogrametría o *TLS* aportan información geométrica completa de estos, un procesamiento posterior de realce es necesario para observar los mismos de un modo más evidente. Durante los últimos años, la aplicación de varios renderizado *Radiance Scaling* (Carrero-Pazos et al., 2012) o *Decorrelation Stretching* como *DStretch* (Harmon, 2008; Le Quellec et al., 2015), se han utilizado para realzar los grabados y pinturas rupestres con grandes resultados. Como se muestra en (Vergne et al., 2010), el complemento *Radiance Scaling Shader* ayuda a realzar las variaciones menores en la profundidad de un modelo, en muchos casos,

identifica detalles que no son visibles a simple vista. Este complemento ajusta las intensidades de luz reflejada en función de la curvatura de la superficie, mejorando así la visualización de las concavidades y convexidades de la misma (Vergne et al., 2010). El renderizado *Radiance Scaling* se utiliza en este caso para realzar los grabados presentes en la roca. Los resultados se comparan con las documentaciones anteriores realizadas con métodos tradicionales, como el *Frotage* o la fotografía digital con luz artificial.

7.2.5. Documentación de arte rupestre con fotogrametría SfM

El estudio se amplía en dos líneas de trabajo. En primer lugar, en el experimento 1, se realiza la documentación geométrica de varios petroglifos ubicados en un área geográfica con un radio de 6 km. Sus localizaciones se muestran en la Figura 1 (Punto 2). Se realizó una toma fotográfica simple con una cámara convencional. Esta tarea fue realizada por un técnico con 5 años de experiencia en fotogrametría terrestre, con el objetivo de evaluar el número de elementos que podrían documentarse en una jornada de campo. En segundo lugar, en el experimento 2, la documentación de varios petroglifos, algunos de ellos aún no documentados geométricamente hasta la fecha, fue realizada por aficionados al arte rupestre, con una sesión de formación de 1 hora y utilizando cámaras convencionales. Sus localizaciones se muestran en la Figura 1 (Puntos 3 a 8). El flujo de trabajo en ambos experimentos se ejecutó de acuerdo con la metodología de toma fotográfica descrita anteriormente, utilizando para el procesado el *software* de computación “en la nube” *Recap Photo* de Autodesk y sin utilizar *GCPs* en el ajuste. Sobre los resultados se aplica posteriormente el renderizado *Radiance Scaling Shader* de *Meshlab*.

7.3. Resultados y discusión

Como resultado del trabajo de campo de *TLS*, se obtuvieron cinco archivos de nube de puntos, que se alinearon y exportaron como una nube única de 9.5 millones de puntos. De esta nube, se obtuvo una malla texturizada simplificada de 8 millones de triángulos (Figura 3-A). La Figura 3-B muestra la malla obtenida con fotogrametría *SfM*. El nivel de detalle es alto y los grabados de la escena se documentan fielmente. Los resultados obtenidos por tres opciones de *software* son visualmente similares.

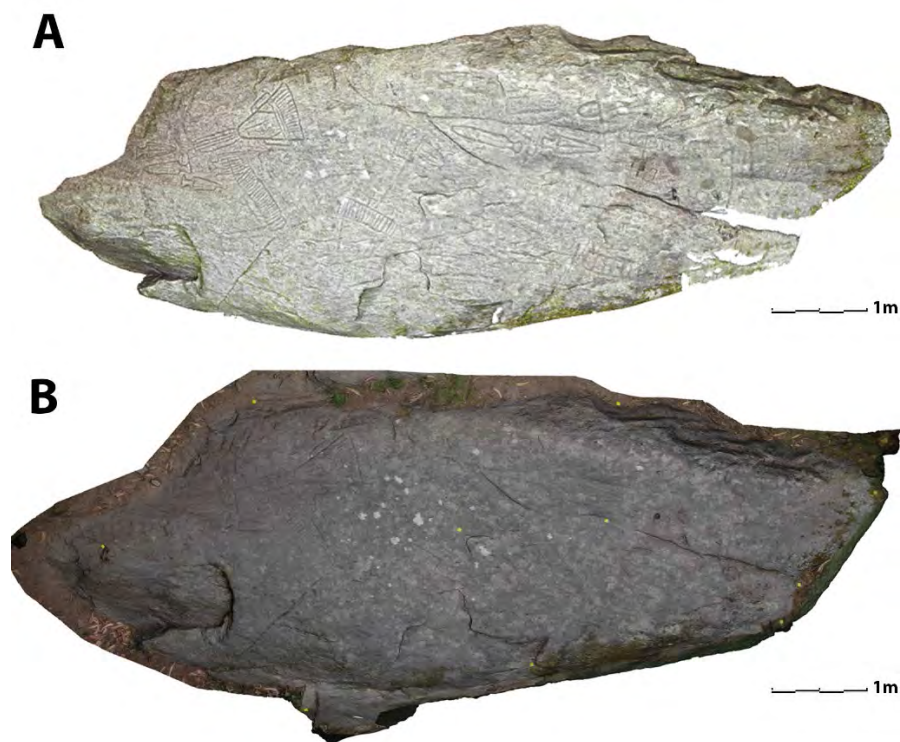


Figura 3. Comparación de mallas. (A) *TLS*. (B) *Autodesk Remake*

7.3.1. Costes y tiempos

La Tabla 1 muestra los costes y resultados del procesado con la técnica *TLS* y los flujos de trabajo fotogramétricos analizados. Los costes y los tiempos de trabajo de campo son considerablemente más bajos para la fotogrametría *SfM* que para el *TLS*. Con la metodología simple, sin *GCP*, el tiempo de campo es notablemente inferior al flujo de trabajo de fotogrametría profesional con *GCP*. Los costes de *Remake* son para licencias anuales, pero este *software* ofrece la posibilidad de adquirir una licencia mensual, que podría ser una opción adecuada para muchos profesionales y no expertos la técnica. El coste de la cámara utilizada en este trabajo es de aproximadamente 300 €. Con *TLS*, el tiempo de georreferenciación, es la suma del tiempo de las tareas de colocación de las esferas y el procesado de la alineación de los de escaneo, mientras que en el procesado fotogramétrico, el tiempo es la suma de las tareas de colocar y medir las dianas en campo y su marcado en el *software* en oficina. El tiempo de georreferenciación en el flujo de trabajo *SfM* simple es el tiempo de escalado con una distancia de referencia y orientación a partir de una plomada y una brújula.

Tabla 1. Comparación de costes, tiempos y resultados del procesado

Indicador	<i>TLS</i>	<i>Software SfM Profesional</i>		<i>Software SfM CC</i>
	<i>Faro Focus3D X 130</i>	<i>Pix4D</i>	<i>PhotoScan</i>	<i>Remake</i>
Coste de software y hardware (\$)	20000	6800	3800	300 anual
Tiempo de trabajo en campo	120	40	40	40
Tiempo de referenciado (minutos)	50	80	80	10
Tiempo de procesado (horas)	4	6	6	5
Nº de puntos (millones)	9,5	10	3,5	3,5
Nº de triángulos (millones)	8	10	9,5	7,5

7.3.2. Precisión geométrica

Una diferencia significativa en el flujo de trabajo del *software* fotogramétrico es que tanto *PIX4D* como *PhotoScan* permiten la introducción de *GCP* en las fotos que intervienen en el ajuste fotogramétrico. Sin embargo, *Remake* solo nos permite introducir puntos en el modelo que reajustan su posición en el espacio pero no influyen en la calibración de la cámara. Por lo tanto, dado que los *GCP* en *Remake* no se utilizan en el ajuste, sus resultados de precisión son menos seguros. Se espera que la marcación de los puntos en todas las fotos en el *software* de escritorio sea más precisa, ya que esto influye en el ajuste, pero el procedimiento es más tedioso que utilizar los marcados en la malla, como se requiere en *Remake*. En el caso de la búsqueda de un método ágil para los profesionales de la arqueología, el uso de *Remake* como *software* de procesado, el escalado en base a

una medida de referencia y la orientación en base a una plomada y una brújula, puede ser el procedimiento más oportuno.

En esta etapa, el modelo obtenido con el *software Remake* se aísla para su comparación con el modelo del *TLS*. El modelo obtenido con este *software* fue elegido por sus costes más bajos, su simplicidad de uso y su naturaleza de computación “en la nube” que permite el uso de un PC de bajo rendimiento, lo que lo convierte en un *software* particularmente interesante para profesionales y aficionados de la arqueología. Además, si la precisión de la malla de *Remake* es suficiente para la documentación de arte rupestre, sus resultados pueden extrapolarse al *software* de escritorio, que se espera que sea más preciso.

El análisis muestra que en torno al 90% de la superficie del afloramiento, las diferencias entre las mallas no superan los 2 mm. La Tabla 2 muestra los resultados estadísticos de la alineación del *TLS* y la malla de fotogrametría. El RMS muestra que a pesar de un error máximo alto de 11 cm en las zonas marginales, los resultados de ambas mallas son similares. El error máximo y la media se calculan de forma independiente en función de los valores positivos y negativos.³

Tabla 2. Resultados estadísticos de la alineación de mallas

Error máximo	+0,117 / -0,094
Media	+0,001 / -0,002m
RMS	0,002 m.
Desv. estándar	0,001 m.

Incluso cuando se escanea desde cinco posiciones, la malla final generada a partir del *TLS* tiene huecos debido a la forma de la piedra que causa áreas ocultas (Figura 3-A). Para detectar grabados en zonas verticales, el *TLS* captura las mediciones perpendiculares a la superficie y obtiene excelentes resultados. Sin embargo, este gran

rendimiento no es habitual con muestras de arte rupestre gallego que normalmente se encuentran en afloramientos horizontales de baja altura. En dicha situación, la recopilación de datos es complicada para el *TLS*, ya que es necesario realizar tomas oblicuas a la superficie de la roca.

7.3.3. Calidad visual

Como se muestra en la Figura 3, la textura y el color del modelo de fotogrametría *SfM* (Figura 3-B) tienen mejor contraste que el obtenido por *TLS* (Figura 3-A). Este resultado era el esperado ya que las fotografías del proceso fotogramétrico se toman con una orientación más perpendicular y más cercana al afloramiento que las tomadas por el *TLS*, que está más limitado en su posicionamiento ya que utiliza exclusivamente las fotografías de 360 ° con resolución de 100 *MPx* en total, que captura desde los 5 puntos de escaneo exclusivamente. Este aspecto es importante ya que una textura satisfactoria de la piedra puede ser útil para estudios de conservación.

COMPARACIÓN DE TLS Y FOTOGRAMETRÍA SfM PARA EL MODELADO 3D DE
ARTE RUPESTRE Y LA APLICACIÓN DEL REALCE RADIANCE SCALING SHADER
PARA LA DETECCIÓN DE GRABADOS

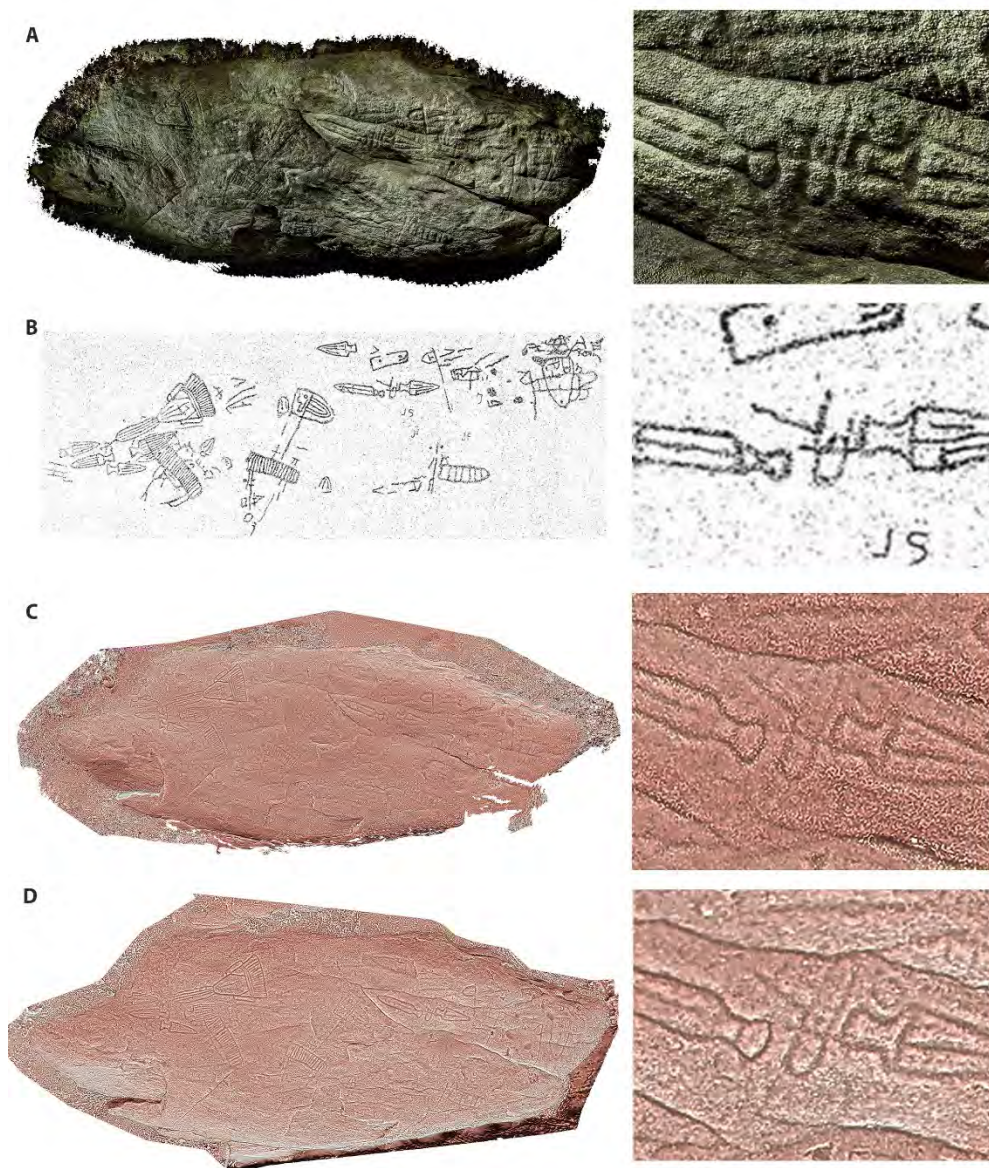


Figura 4. Cuatro ejemplos de documentación de los grabados del Castriño de Conxo. (A) Fotografía digital realizada por miembros del *Colectivo A Rula*. (B) *Frotage* realizado por A. de la Peña-Santos (1979). (C) Modelo TLS. (D) Modelo de fotogrametría SfM.

7.3.4. Potencial en la detección de grabados

No se observan diferencias significativas entre los resultados obtenidos con la malla 3D de *Remake* (Figura 4-D) y la malla *TLS* (Figura 4-C), pero la fotogrametría ofrece resultados con menos ruido después de la aplicación de los renderizados *Radiance Scaling*. Esto se atribuye a los posibles errores en la combinación de escaneos. La Figura 4-A es una fotografía digital obtenida con luz artificial, que también proporciona resultados satisfactorios. La Figura 4-B muestra una documentación utilizando la técnica tradicional de *Frotage* la cual no detecta tantos grabados como el modelo fotogramétrico.

7.3.5. Resultados de los experimentos

En el primer experimento, en un solo día de campo, fue posible documentar un total de 20 petroglifos de distinta tipología. Los resultados de la documentación de 4 de los 20 elementos junto con la disposición fotográfica utilizada en ellos se muestran en la Figura 5. La metodología ha sido realmente eficiente debido a las indicaciones de los colaboradores locales para la ubicación de los petroglifos y la agilidad de la técnica empleada, la cual permite ejecutar una documentación masiva en un área con afluencia de arte rupestre. En el segundo experimento, voluntarios no expertos en fotogrametría realizaron la documentación geométrica de petroglifos no documentados hasta la fecha o cuya documentación estaba incompleta. El experimento muestra que la metodología simple es accesible para los no expertos en esta técnica.

Nossa Senhora da Assunção - B5



Labirinto de Sá - E1



Badim - C3



Nossa Senhora da Assunção - B6



Figura 5. Experimento 1, disposición fotográfica y resultados finales.

7.4. Conclusiones

La principal conclusión de este estudio es que con una técnica de fotogrametría simple que es accesible para perfiles no técnicos y que tiene un gran rendimiento en términos de tiempo de ejecución y coste, se obtuvieron resultados que mejoraron los obtenidos con *TLS* para la documentación de un petroglifo con geometría compleja.

La comparación muestra que la fotogrametría es una alternativa más avanzada, ya que permite obtener resultados precisos con modelos sin agujeros, con mejores texturas y con mejor detección de grabados en relación con los obtenidos con el *TLS*. El tiempo de trabajo con fotogrametría *SfM* es mucho menor que con el *TLS*, y varios equipos pueden trabajar simultáneamente a bajos costes. La comparación de precisión geométrica muestra que las diferencias entre ambas mallas en el área de estudio son menores de 2 mm. Por lo tanto, la fotogrametría *SfM* simple puede considerarse geoméricamente cercana al *TLS*.

Los experimentos realizados en este estudio muestran el rendimiento y la accesibilidad de la técnica. Es posible que a través de metodologías simples de fotogrametría *SfM*, se pueda lograr la documentación de un gran número de elementos en un solo día de trabajo de campo, como se muestra en el primer experimento. Además, esta técnica es accesible para todos con un mínimo de instrucción, como se muestra en el segundo experimento. Solo se necesita una cámara convencional para realizar una documentación con la calidad suficiente para un análisis geométrico del arte rupestre, y debido a la colaboración social altruista, es posible que se puedan llevar a cabo futuras campañas de documentación masiva de varias rocas que de otra forma no serían documentable por razones técnicas y económicas y que requeriría pericia profesional.

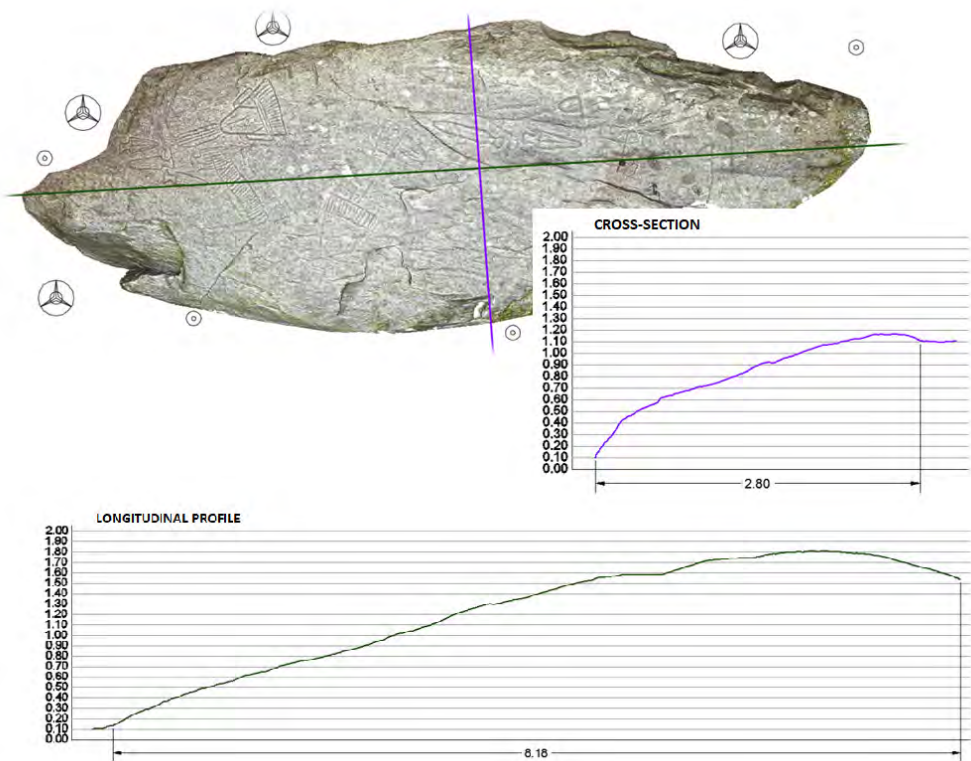
Además, en este estudio, se realizó un análisis de los grabados con los renderizados *Radiance Scaling* tanto en el modelo obtenido con *TLS* como con fotogrametría. Los resultados muestran que esta técnica representa una alternativa potencialmente superior a la de las metodologías tradicionales en ambos casos. La fotogrametría muestra resultados ligeramente mejores que el *TLS* después de la aplicación de

este tratamiento. Otros realces, como el *DStretch* utilizado en (Le Quellec et al., 2015), que se utiliza más a menudo en pinturas rupestre, puede ser efectivo para grabados, sería conveniente realizar un análisis en profundidad del funcionamiento de estos métodos de post-procesado y evaluar su potencial en el contexto de otros ejemplos de arte rupestre.

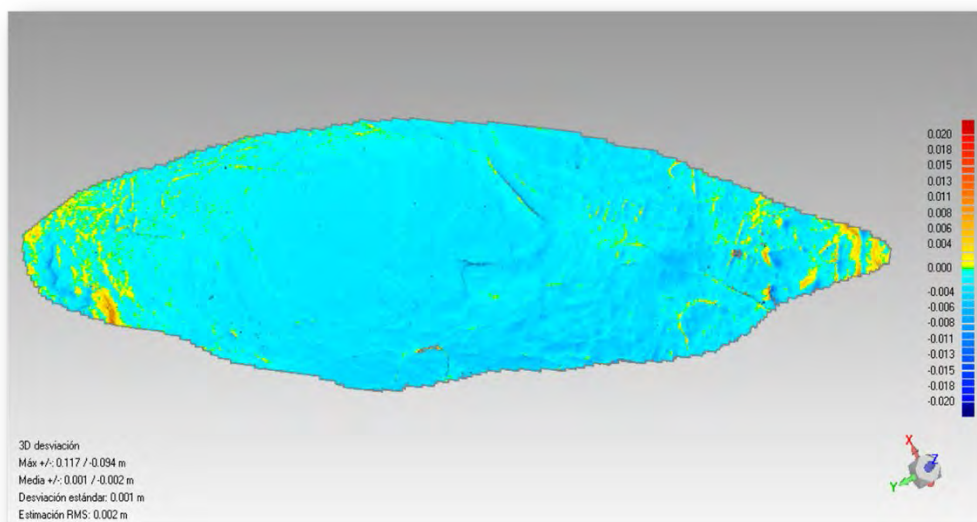




MATERIAL SUPLEMENTARIO



Suplemento 1. Perfiles del afloramiento.



Suplemento 2. Análisis de resultados de la alineación de las mallas de *TLS* y fotogrametría.



Suplemento 3. Captura de alta resolución de la malla obtenida con fotogrametría *SfM* y la aplicación del *plugging Radiance Scaling* de *Meshlab*, *Castríño de Conxo*.



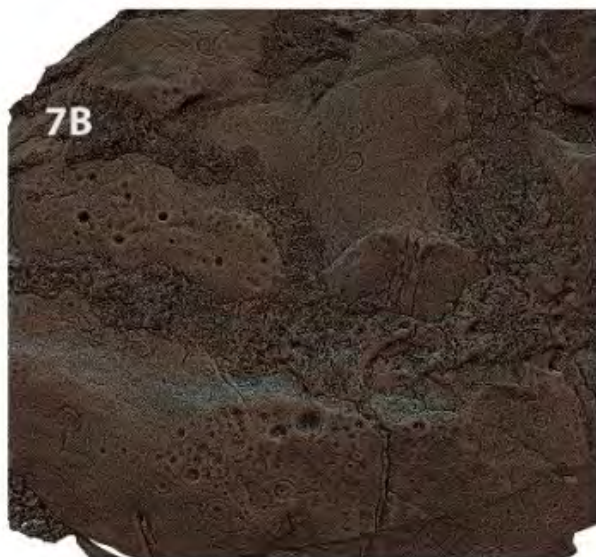
Suplemento 4. Resultados finales de los restantes elementos del experimento 1.



Suplemento 4. Resultados finales de los restantes elementos del experimento 1.



Suplemento 5. Resultados finales del experimento 2. (3) *Monte Castelo, Ames*. (4) *Pedra da Grada, Moraña* (5) *O Pumariño, Brión*. (6) *Cortellos, Santiago de Compostela*. (7) *Pedrouzos, Vimianzo*. (8) *Chan das Lamas, A Estrada*.



Suplemento 5. Resultados finales del experimento 2. (3) *Monte Castelo, Ames*.
(4) *Pedra da Grada, Moraña* (5) *O Pumariño, Brión*. (6) *Cortellos, Santiago de*
Compostela. (7) *Pedrouzos, Vimianzo*. (8) *Chan das Lamas, A Estrada*.



Suplemento 5. Resultados finales del experimento 2. (3) *Monte Castelo, Ames*. (4) *Pedra da Grada, Moraña* (5) *O Pumariño, Brión*. (6) *Cortellos, Santiago de Compostela*. (7) *Pedrouzos, Vimianzo*. (8) *Chan das Lamas, A Estrada*.

8. CAPITULO IV

UNA METODOLOGÍA DE TRABAJO SIMPLE Y DE BAJO COSTE AL ALCANCE DE MÚLTIPLES PERFILES PARA EL MODELADO 3D Y VECTORIZACIÓN AUTOMATIZADA DE GRABADOS DE ARTE RUPESTRE “ATLÁNTICO”

RESUMEN:

En los últimos años, el modelado 3D con fotogrametría y los métodos de realce originarios en las comunidades de gráficos por ordenador se han utilizado con excelentes resultados para estudios de grabados de arte rupestre. Sin embargo, la mayoría de los elementos del arte rupestre “Atlántico” en la Península Ibérica aún no se han documentado geométricamente. Los objetivos de este estudio incluyen profundizar en la aplicación de la fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*), en el post-procesado digital de la información 3D y en las herramientas de difusión online disponibles actualmente, determinando un flujo de trabajo que sea accesible para los investigadores, profesionales y aficionados de este patrimonio, permitiendo la documentación de este fenómeno de un modo masivo. Por ello, en este estudio se obtuvieron los modelos 3D de una muestra representativa del arte rupestre “Atlántico” utilizando una metodología de fotogrametría *SfM* simple y se muestra un flujo de trabajo

optimizado para el realce y obtención de los resultados vectoriales finales. Este estudio muestra el gran potencial del flujo de trabajo propuesto para obtener interpretaciones 2D objetivas además de la publicación directa de modelos 3D realzados, que actualmente es posible con plataformas como *Sketchfab*, eliminando los posibles errores interpretativos derivados de la proyección de información 3D en un formato 2D. Esta posibilidad en combinación con un flujo de trabajo de fotogrametría *SfM* simple y de bajo coste puede sentar las bases de una catalogación masiva colaborativa de este patrimonio.



8.1. Introducción

La documentación geométrica es una parte importante de las tareas que engloba la protección del patrimonio. La evolución de los estudios de arte rupestre se caracteriza por la búsqueda continua de técnicas de registro confiables y precisas. En concreto, para la documentación geométrica de grabados de arte rupestre, se han utilizado tradicionalmente diferentes métodos, como el dibujo a mano alzada, el *Frotage*, el calco sobre plástico o la fotografía nocturna (Arcà, 2006; González-Aguilera et al., 2009; Lewis-Williams & Páger, 1990; Moneva Montero, 1993). Su ejecución además de tediosa, en algún caso puede ser agresiva con el elemento al requerir contacto directo con este. Actualmente, el uso de técnicas de adquisición de datos, provenientes de la ingeniería, como el escáner láser terrestre (*TLS*) (Arayici, 2007; Brumana et al., 2014; Jim H. Chandler et al., 2007; McPherron et al., 2009; Simpson et al., 2004) o la fotogrametría *Structure from Motion* (*SfM*) (Jalandoni et al., 2018; López et al., 2016; Meijer, 2015), están creciendo en popularidad en el sector patrimonial. Ambas metodologías se basan en la obtención de modelos 3D de alta resolución, hasta varios puntos por mm², que permiten la documentación de la geometría compleja y el color de los elementos de patrimonio (Grussenmeyer et al., 2012; Remondino & El-Hakim, 2006; De Reu et al., 2013a; Yilmaz et al., 2007). Además, ni la fotogrametría *SfM* ni la tecnología *TLS*, tienen las limitaciones asociadas con las técnicas tradicionales, en cuando a que son agresivas, limitadas en precisión o consumen mucho tiempo (Díaz-Andreu et al., 2006). Aunque ambas técnicas se utilizan ampliamente, la inversión requerida para el modelado 3D con fotogrametría *SfM* es significativamente menor que con *TLS*, y la adaptación de esta técnica a las geometrías complejas de los afloramientos rocosos suele ser mejor que con el *TLS* (Peña-Villasenín et al., 2018). Esta adaptación a las tareas de documentación de grabados se debe en parte a que la fotogrametría *SfM* tiene una amplia variabilidad metodológica, lo que le permite ejecutarse con flujos de trabajo simples. La adquisición de datos mediante esta tecnología es relativamente fácil de aprender y además el *software* fotogramétrico es de uso sencillo dado el alto grado de automatización del proceso.

La fotogrametría es una técnica con una larga trayectoria que ha experimentado importantes avances con la aparición de los algoritmos de *Structure from Motion* (*SfM*). Los orígenes de la fotogrametría *SfM* se encuentran en la comunidad de visión artificial (Furukawa et al., 2010; Spetsakis & Aloimonos, 1991) y en el desarrollo de los algoritmos automáticos de emparejamiento de características (Harris & Stephens, 1988; Otto & Chau, 1989). En la fotogrametría *SfM*, la posición de la cámara y la geometría de la escena se reconstruyen simultáneamente a través de la identificación automática de las características coincidentes (Chandran et al., 1997). Estas características permiten realizar estimaciones iniciales de las posiciones de la cámara y las coordenadas del objeto, que luego se refinan de forma iterativa utilizando una minimización no lineal de mínimos cuadrados. El sistema de ajuste *Bundler* (Snavely et al., 2008) se utiliza para esta tarea. Posteriormente, se puede obtener una nube de puntos de mayor densidad utilizando los algoritmos *Clustering view for Multiview Stereo* (*CMVS*) y *Patch-based Multiview Stereo* (*PMVS2*) (Furukawa et al., 2010; Furukawa & Ponce, 2010). La aparición de estas técnicas nos ha permitido trabajar con superficies complejas (Barazzetti et al., 2011) y obtener nubes de puntos, mallas de triángulos y, finalmente, un modelo texturizado tridimensional completo (Westoby et al., 2012). Una gama de motores de procesamiento en la nube, especialmente *Photosynth* (Microsoft Corporation, USA) han popularizado la técnica *SfM* (Snavely et al., 2008). Se desarrollaron servicios gratuitos de computación en la nube, como *123D Catch* (Autodesk Inc., USA.) (Lavy et al., 2015), *ARC3D* (Ku Leuven, Bélgica) (Tingdahl & Van Gool, 2011), y *Recap Photo* (Autodesk Inc., USA) (Eulitz & Reiss, 2015; Greif et al., 2017), así como *software* de escritorio profesional como *PhotoScan* (Agisoft LLC., Rusia) (De Reu et al., 2013a), *Pix4D* (EPFL, Suiza) (Turner et al., 2014), entre otros.

Esta técnica es fácilmente asimilable por perfiles no expertos como se muestra en estudios en numerosos campos como en el del diseño (Borysenko, 2018), en la medicina (Grant et al., 2019; Koban et al., 2014; Mahmoud & Bennett, 2015; Salazar-Gamarra et al., 2016), en biología (Gutierrez-Heredia et al., 2016; Lavy et al., 2015), en geología (Chidburee et al., 2016; Micheletti et al., 2015) en educación

(Mills, 2015), en arquitectura (Peña-Villasenín et al., 2017) en esdios de patrimonio (Uygun et al., 2016) y concretamente en petroglifos (Jim; Chandler & Fryer, 2013; José L. Lerma et al., 2014).

Los modelos 3D de fotogrametría son de forma evidente útiles para el estudio geométrico de petroglifos, pero a pesar de la utilidad de los mismos, debido a la sinuosidad de los grabados, todavía es necesario utilizar algún método de realce para obtener una mejor visualización de los grabados. Una posibilidad de realce es la generación de sombras relevantes basadas en la modificación de puntos de iluminación virtuales en el modelo 3D, como se muestra en (Mudge et al., 2006). Otra posibilidad es la magnificación de los ejes perpendiculares del objeto (eje Z), como se describe en (Ortiz-Sanz et al., 2010). La utilización de otros métodos más avanzados, como *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) (Díaz-Guardamino & D, 2013; Domingo et al., 2013; Duffy et al., 2013; Earl et al., 2010; Mudge et al., 2006, 2012), que se basan en un análisis del cambio del punto de iluminación en una colección de fotos, supuso un avance importante en el análisis de grabados de arte rupestre. En los últimos años, otros flujos de trabajo originados en la comunidad de gráficos por computadora (Pires et al., 2015; Saito & Takahashi, 1990), en concreto los renderizados *Radiance Scaling*, que se basan en el análisis morfológico de los modelos 3D como se describe en (Vergne et al., 2010, 2018) y utilizado para la detección de grabados en (Carrero-Pazos et al., 2012; López-Menchero Bendicho et al., 2017; Medici & Rossi, 2015), han demostrado un gran potencial para esta tarea. El *software Meshlab* (Visual Computing Lab, ISTI-CNR, Italy), (Vergne et al., 2018) y *Xshade* (*exaggerated shading for depicting shape and detail*) (Rusinkiewicz et al., 2006) permiten realzar los modelos 3D con resultados similares. Además, el estudio directo de modelos 3D es actualmente posible de modo online, como se muestra en plataformas como *Sketchfab* o *3DHOP* (Potenziani et al., 2015; Scopigno et al., 2017).

A pesar de los realces y las herramientas de publicación online citadas, todavía se demanda una vectorización esquemática de los

grabados para facilitar el estudio y la interpretación. Para lograr la objetividad metodológica en este paso, se recomienda que la vectorización de las capturas ráster sea automática. La vectorización automática de imágenes, como *Edge Detector* en pinturas rupestres, se muestra en (Clogg et al., 2000; Harmon, 2008; Mark & Billo, 2002; Mas Cornellà et al., 2010), donde se analizan diferentes técnicas como *Decorrelation Stretch* para la vectorización automática de pinturas rupestres a partir de imágenes digitales; Las técnicas de vectorización automática también se utilizan en grabados en roca, como se muestra en (Ortiz-Sanz et al., 2010). Recientemente, se describe un tratamiento previo de capturas 2D basadas en subexposición y sobreexposición de la captura, generando un resultado que mejora y facilita la vectorización posterior (Carrero-Pazos et al., 2018), la cual se puede completar fácilmente usando recursos online gratuitos como Vectorizer (Massow, 2015), *Online-Convert* o *Vector Magic* (Godfrey & Eveleth, 2015; Lacroix, 2009).

Aunque los avances técnicos citados anteriormente han supuesto un avance importante en la tarea de documentación, el inventario geométrico del arte rupestre continúa presentando muchos desafíos debido a la gran cantidad de petroglifos presentes en el territorio. Actualmente, solo en Galicia, como se muestra en (Rodríguez Rellán et al., 2018), se han localizado más de 3000 petroglifos; por lo tanto, la documentación masiva de este fenómeno del patrimonio no es factible por razones técnicas y económicas, y al mismo tiempo, la protección del mismo es altamente necesaria debido al gran riesgo de deterioro que presentan debido a la exposición total a agentes externos. Por ello, es necesario continuar profundizando en la comprensión y el uso de técnicas de documentación con gran objetividad, como la fotogrametría, en sus variantes simples y de bajo coste, así como en los renderizados *Radiance Scaling* y en las aplicaciones de vectorización automática. Los estudios citados anteriormente han demostrado la eficacia de estas técnicas y su uso es ya un hecho. Sin embargo, para obtener modelos en 3D, generalmente se proponen metodologías fotogramétricas complejas que requieren el uso de dispositivos topográficos, *software* de pago, drones, postes o cámaras específicas, equipos que no suelen ser accesibles a perfiles no especializados.

Además, las variables de configuración posibles en el uso de realces son extensas, así como de las herramientas de vectorización automática. También es importante profundizar la comprensión y en el uso de aspectos como los tratamientos de malla previos a los realzados, así como el comportamiento de los tratamientos sobre diferentes tipos de materiales rocosos o tipos de grabado. Además, es posible la difusión online de los modelos 3D para su difusión científica mundial. Es por ello que en este estudio, se evalúan diferentes variables de configuración del realce de modelos 3D fotogramétricos y distintas posibilidades para su difusión de los mismos, sobre una muestra representativa de arte rupestre “Atlántico”. Se propone y testea un flujo de trabajo muy simple, accesible a perfiles no expertos, que permite la documentación y difusión de este fenómeno patrimonial de un modo masivo.

8.2. Metodología

La tipología de petroglifos del arte rupestre “Atlántico” es muy amplia e incluye formas predominantemente geométricas con trazos largos, formas naturalistas con trazos cortos y cavidades circulares (Bradley et al., 1994; Bradley & Fábregas-Valcarce, 1998). Para este estudio, se eligen varios petroglifos como muestras representativas de los tipos de grabado y soporte de roca comunes. A continuación se muestra la ubicación de estos petroglifos, la metodología de fotogrametría *SfM* empleada para generar los modelos 3D, los post-tratamientos de la malla, los post-tratamientos digitales 2D, la vectorización automática y el flujo de publicación online de los modelos.

8.2.1. Localización

Los ejemplos de arte rupestre de este estudio se ubican para el caso 1 en el norte de Portugal y los casos 2 a 7 en Galicia. El caso 1 es el petroglifo (PT) de *Fontão do Eido* (en Verdoejo, Valença do Minho), que fue elegido para el análisis principal debido a su variedad de grabados, incluyendo zoomorfos, figuras geométricas, cazoletas, líneas, elipses, etc. Los otros casos de estudio se relacionan a

continuación: PT de *Pedra da Grada*, Moraña (Caso 2), PT de *Pedra da Loba*, Ames (Caso 3), PT de *Peneda Negra*, Ames (Caso 4), PT de *Outeiro dos Furados*, Muros (Caso 5), PT de *A Fieiteira*, Ponteceso (Caso 6) y PT de *O Castriño de Conxo*, Santiago de Compostela (Caso 7). Las ubicaciones de todos los casos se muestran en la Figura 1.

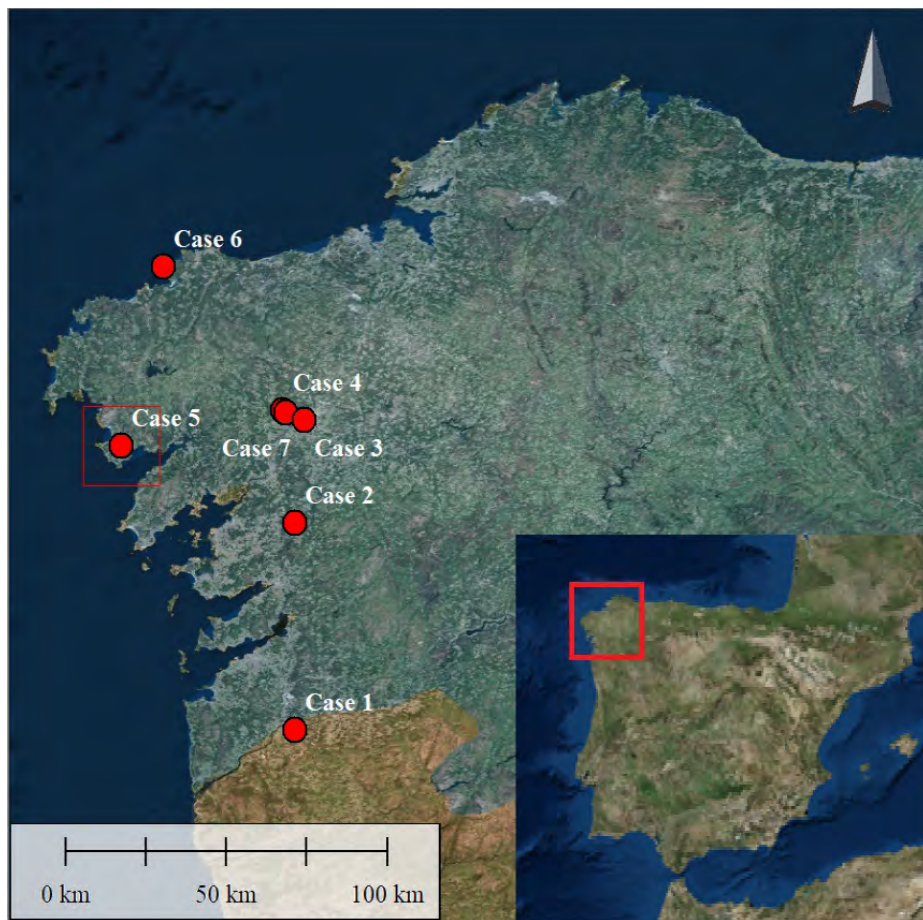
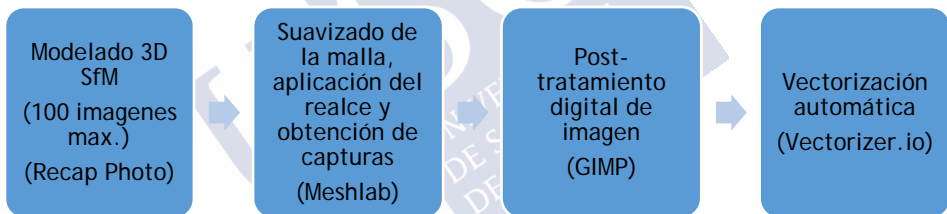


Figura 1. Localización de los ejemplos de arte rupestre estudiados.

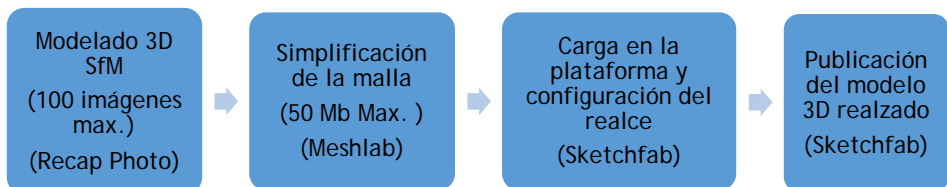
8.2.2. Materiales

Para el modelado 3D con fotogrametría *SfM*, en la toma fotográfica, se utilizaron diferentes cámaras convencionales y de *SmartPhone*. Para el procesamiento *SfM*, se utilizó el *software Recap Photo* en todos los casos. Los modelos se importaron en *Meshlab* y las capturas en 2D se trataron en *GIMP* (Programa de manipulación de imágenes de *GNU*). La vectorización automática se realizó en el servicio online *Vectorizer.io* (Massow, 2015) y *Sketchfab* se utilizó como plataforma para la publicación online de los modelos 3D. Todos los programas utilizados son gratuitos para fines no lucrativos. A continuación se muestran los flujos de trabajo probados y el *software* utilizado en cada paso.

- Para la obtención del calco vectorial:



- Para el estudio y difusión online en 3D:



8.2.3. Modelado 3D con fotogrametría SfM.

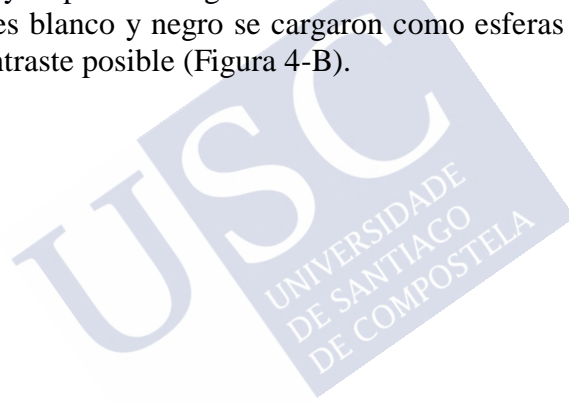
Para obtener un modelo 3D de los casos de estudio, se empleó una metodología simple de toma fotográfica. Se utilizaron cámaras convencionales para obtener imágenes oblicuas a aproximadamente 45 grados verticalmente, describiendo un círculo alrededor del elemento. En general, las imágenes deben tomarse consecutivamente sin cambios en la perspectiva de más de 15 grados horizontalmente. Siempre que sea posible, todas las superficies de roca deben cubrirse desde múltiples perspectivas, ya que la disposición fotográfica debe adaptarse a las particularidades de cada caso. Si el elemento tiene grandes dimensiones, se recomiendan varias pasadas longitudinales en el afloramiento en ambas direcciones de avance. Otras técnicas topográficas complementarias no son necesarias si el modelo está escalado por una o más mediciones de referencia. Estas indicaciones se proporcionaron a un grupo de investigadores aficionados del arte rupestre, y estos completaron la fase de adquisición de datos en el campo para todos los casos de estudio y, por lo tanto, se utilizaron diferentes cámaras en cada uno de ellos. No se utilizó trípode y se emplearon un máximo de 100 imágenes por caso de estudio.

8.2.4. Tratamiento de realce de los modelos 3D

Las mallas obtenidas en la etapa anterior se importaron al *software Meshlab* para la aplicación del realce del grabado. En primer lugar, se analiza la aplicación de una luz lateral virtual. Por otro lado, debido a la textura granular de la piedra y los posibles errores del modelo 3D, el suavizado de la malla antes de la aplicación del realce puede mejorar los resultados de detección de grabado. *Meshlab* permite la aplicación de diferentes métodos de suavizado; en este caso, se aplicó el suavizado *Laplacian Smooth* a las mallas originales para evaluar cómo esta técnica de suavizado afecta sobre el resultado final. Posteriormente, se aplicaron diferentes opciones de aplicación de realce, en primer lugar el renderizado *Minnaert* (Ganovelli et al., 2014), sobre el cual se aplicaron diferentes intensidades de iluminación.

A continuación, se utilizaron los renderizados *Radiance Scaling*. Hay cuatro opciones posibles en la aplicación de esta realce, que se

describen en (Vergne et al., 2018). El renderizado *Lambert Radiance Scaling* se muestra de forma predeterminada. En este renderizado, la disposición del punto de luz tiene influencia en la apariencia, por lo que se obtuvieron diferentes capturas considerando este aspecto. A continuación se testea el realce *Lit Sphere Radiance Scaling*, *Colored Descriptor* y *Grey Descriptor*; En estos casos, la disposición del punto de iluminación no influye en el resultado. Particularmente, en el realce *Lit Sphere Radiance Scaling* (Sloan et al., 2001) codifica el entorno de iluminación y las propiedades de reflexión sobre una imagen de una esfera (Figura 4-A). Para mejorar aún más la legibilidad, en este caso se puede configurar la esfera iluminada para las regiones convexas y cóncavas, y es posible cargar otras esferas iluminadas personalizadas. Los colores blanco y negro se cargaron como esferas para obtener el mayor contraste posible (Figura 4-B).



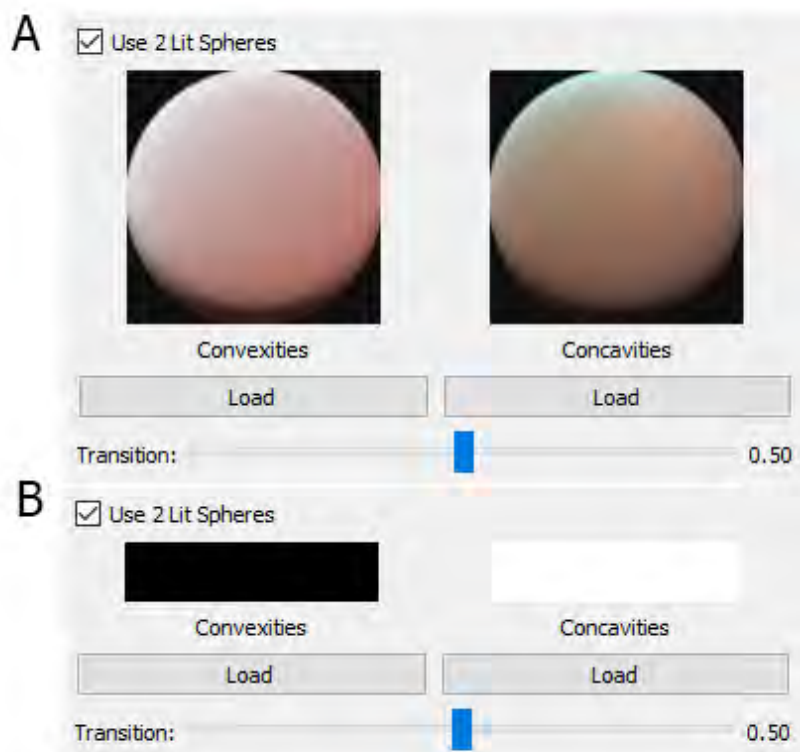


Figura 4. Menú de configuración del renderizado *Lit Sphere Radiance Scaling Shader* (A) Esferas por defecto (B) Colores negro y blanco cargados como esferas.

Con respecto al renderizado *Grey Descriptor*, en el que simplemente se realiza la curvatura para cada posición del objeto, y con respecto a *Colored Descriptor*, en el que las convexidades y concavidades se muestran con dos colores distintos (azul y rojo), solo el parámetro *transition* es configurable.

Después de aplicar cada una de las opciones de realce mencionadas anteriormente, se realizaron capturas de los resultados desde la perspectiva superior utilizando la herramienta *Snapshot*. Esta herramienta permite la configuración del factor multiplicador de la

resolución de la imagen cuando se exporta esta captura, en este sentido, también se probaron diferentes valores de calidad de exportación.

8.2.5. Post-tratamiento digital 2D

La técnica descrita en (Carrero-Pazos et al., 2012) se aplica en a los archivos ráster obtenidos como resultado del paso anterior. Esta técnica, consiste en oscurecer y aclarar la imagen mediante las herramientas del *software Photoshop*, con la diferencia que en este caso se utilizó *GIMP* como una opción de *software* libre para esta tarea.

8.2.6. Vectorización automática

Posteriormente, se aplicó un tratamiento de vectorización automático a las capturas dando lugar a los productos vectoriales finales. Debido a la facilidad de uso y la posibilidad de configurar diferentes variables en esta vectorización, se utilizó el servicio online gratuito *Vectorizer* (Massow, 2015). En este servicio, es posible seleccionar diferentes parámetros de configuración, como el número de colores a segmentar, la agrupación de colores (tolerancia), el área mínima en número de píxeles, el desenfoque y varias opciones para el fondo, como se muestran en la Figura 5.

The image shows the Vectorizer.io web interface. At the top, there are controls for 'Zoom' and 'Presets'. Below these are settings for 'Max Colors' (set to 2), 'Grouping' (50%), and 'Order' (by color (desc)). A central area displays a preview of a vectorized image with a 'Color Groups' label and a vertical slider set to 50%. Below the preview are zoom and pan icons, and a blue 'vectorize' button. Further down, there are settings for 'Min Area' (5 px²), 'Blur' (0%), and 'Background' (merge). At the bottom, a 'Selected Colors' section lists two color groups: a dark gray group at 0% (28.43%) and a light gray group at 0% (73.56%).

Zoom Presets

Max Colors 2 (E) + - Grouping 50% + - Order by color (desc) v

Color Groups:

50%

vectorize

Min Area 5 px² + - Blur 0% + - Background merge v

Selected Colors:

<input checked="" type="checkbox"/>		0% v	(28.43%)	
<input checked="" type="checkbox"/>		0% v	(73.56%)	

Figura 5. Configuraciones del servicio online de vectorización automática *Vectorizer.io*.

8.2.7. Publicación online.

Finalmente, los modelos 3D fueron publicados en la plataforma online *Sketchfab* aplicando el realce *Skin Light Matcap*, que es similar al renderizado *Lit Sphere Radiance Scaling* de *Meshlab* en algunos casos y *Old Metal Matcap*, similar a *Minnaert shader* en otros casos. Para la publicación gratuita, fue necesario reducir el número de triángulos ya que el límite de la cuenta gratuita es de 50 Mb. Se utilizó un solo archivo en *STL* comprimido en formato *RAR*, sin textura para conservar la mayor densidad de malla. De este modo, fue posible cargar mallas de aproximadamente 2.5 millones de triángulos. En algunos casos, fue necesario reducir la densidad de exportación de la malla; en otros casos, la malla fue cortada, descartando las zonas donde no se observaron grabados.

8.3. Resultados y discusión

8.3.1. Modelado 3D con fotogrametría SfM

La Tabla 1 muestra un resumen de los resultados obtenidos en las labores de documentación:

Tabla 1. Fotogrametría SfM. Resultados del modelado 3D.

Caso	Imágenes	Cámara	Vértices (millones)	Triángulos (millones)
Caso 1	100	Canon EOS 600D - 18 Mpx	3.4	6.9
Caso 2	54	Canon EOS 600D - 18 Mpx	1.0	2.1
Caso 3	100	Olympus-E-P2 - 12 Mpx	1.5	2.9
Caso 4	100	Olympus-E-P2 - 12 Mpx	2.2	4.4
Caso 5	100	Sony-a6000 - 24 Mpx	4.0	8.1
Caso 6	54	Xiaomi MI 4I - 10 Mpx	0.8	1.5
Caso 7	100	Olympus-E-P1 - 12 Mpx	3.7	7.3

El factor más limitante en la publicación modelo es el tamaño, ya que los 50 Mb de límite permiten la publicación de una malla con 2.5-3 millones de triángulos, mientras que la metodología fotogramétrica sencilla y de bajo coste utilizada permite obtener mallas que exceden este límite en la mayoría de los casos. La Figura 6 muestra el modelo 3D obtenido en el Caso 1 y la disposición de la foto utilizada. Esta figura muestra que la técnica de disposición de toma fotográfica es flexible y permite la adaptación a las particularidades de cada elemento. En este caso, la disposición de las fotos obtenidas por el colaborador no experto, no se adapta exactamente a la metodología recomendable para la sesión de fotos, no obstante, el *software* pudo correlacionar las imágenes y obtener resultados válidos para un análisis objetivo de los grabados. Los demás casos de estudio también mostraban desajustes similares en la disposición de toma fotográfica, pero el *software Recap Photo* también pudo correlacionar las imágenes en todos los casos.

Cabe señalar que a los colaboradores aficionados que participaron en este estudio con conocimientos previos de manejo de cámaras fotográficas, no les resultó difícil asimilar las tareas necesarias para la toma de datos fotogramétrica, por otro lado, aquellos que carecían de experiencia en el manejo de cámaras fotográficas presentaron más dificultades de aprendizaje, aunque esto fue fácilmente solventable en la mayoría de casos, empleando los modos automáticos de las cámaras digitales, sin tener una influencia significativa en los resultados. Por otro lado, los colaboradores no experimentados en la técnica de toma de datos fotogramétricos, acostumbran a obtener una colección de imágenes con un nivel de solape insuficiente para el procesado de las mismas por *SfM*, por ello, es importante incidir en la necesidad de realizar un número de fotos muy elevado y con gran solape ya que este suele ser el error más común en no expertos. Un exceso de fotografías siempre será solventable mientras que su insuficiencia implica la repetición del trabajo. Otros problemas como los derivados de las geometrías complejas de los afloramientos rocosos, en ocasiones invadidos por la vegetación; la orientación de los mismos con respecto al sol que impiden la realización de fotografías sin generar sombras en la roca; o su estado de conservación en cuanto a la presencia de

musgos/líquenes, sedimentos o humedades, son condicionantes negativos en la aplicación de la técnica, pero los cuales también se presentan en trabajos profesionales, y con los cuales aficionados y profesionales debemos lidiar.

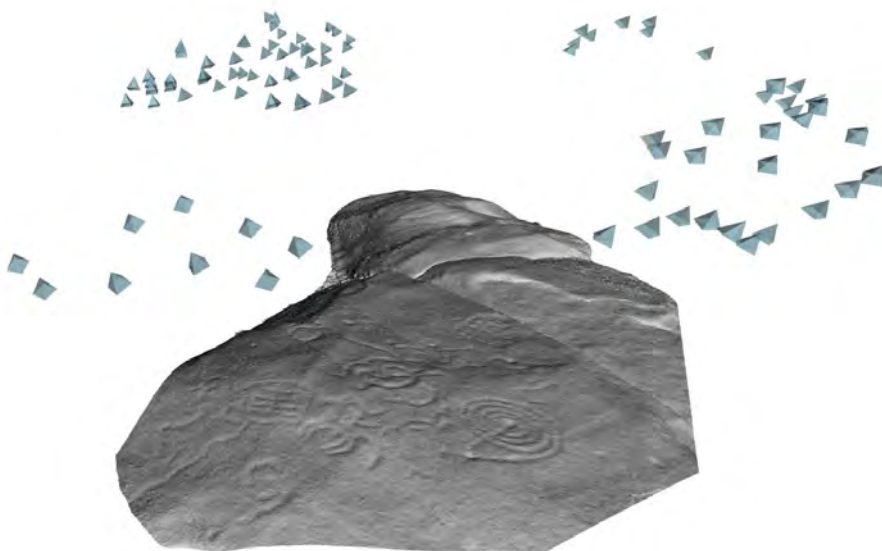


Figura 6. Disposición de tomas fotográficas y modelo 3D resultado del Caso 1.

8.3.2. Tratamiento de realce del grabado

Los resultados de la aplicación de las diferentes variables de configuración del realce testeadas en *Meshlab* se muestran a continuación. En primer lugar, en la Figura 7 se muestra el modelo con 4 direcciones de iluminación (arriba A, abajo B, izquierda C y derecha D).

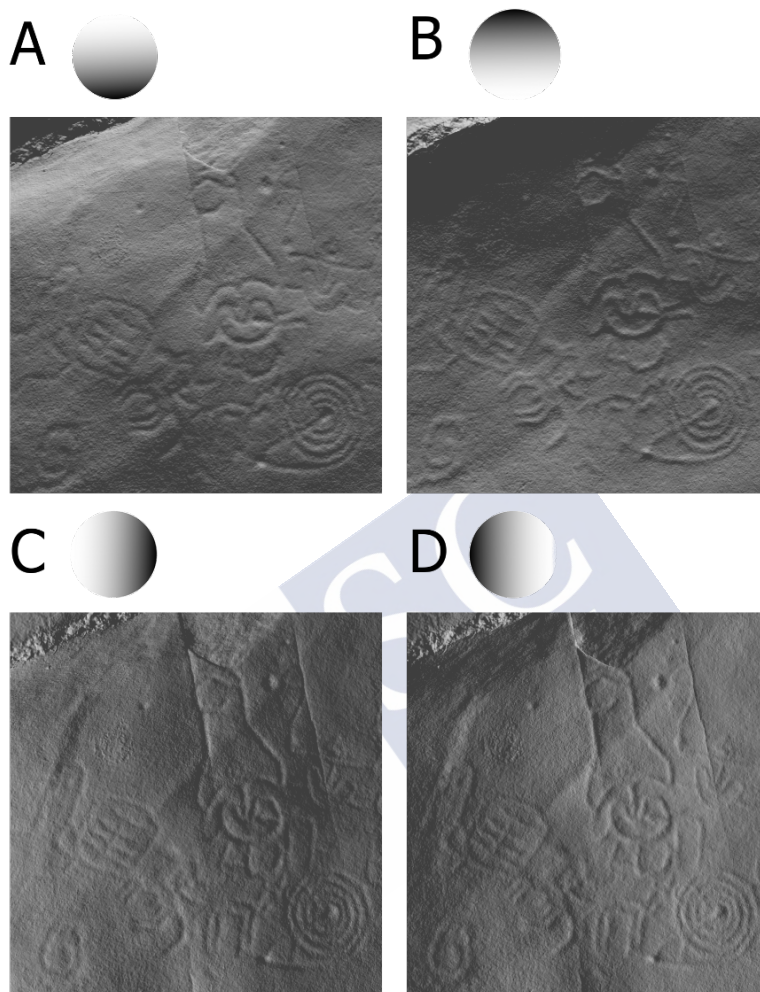


Figura 7. Caso 1: Modelo 3D con cuatro direcciones de iluminación (superior A, inferior B, lateral izquierda C, y lateral derecha D).

A continuación, en la figura 8, se muestran los resultados obtenidos con el renderizado *Minnaert* (Figuras 8-A y 8-B), con el renderizado *Lambert Radiance Scaling* (Figura 8-C) y este mismo con variaciones en el ángulo de iluminación (Figura 8-D), el renderizado *Lit Sphere Radiance Scaling* (Figura 8-E) y el renderizado *Grey Descriptor* (Figura 8-F).

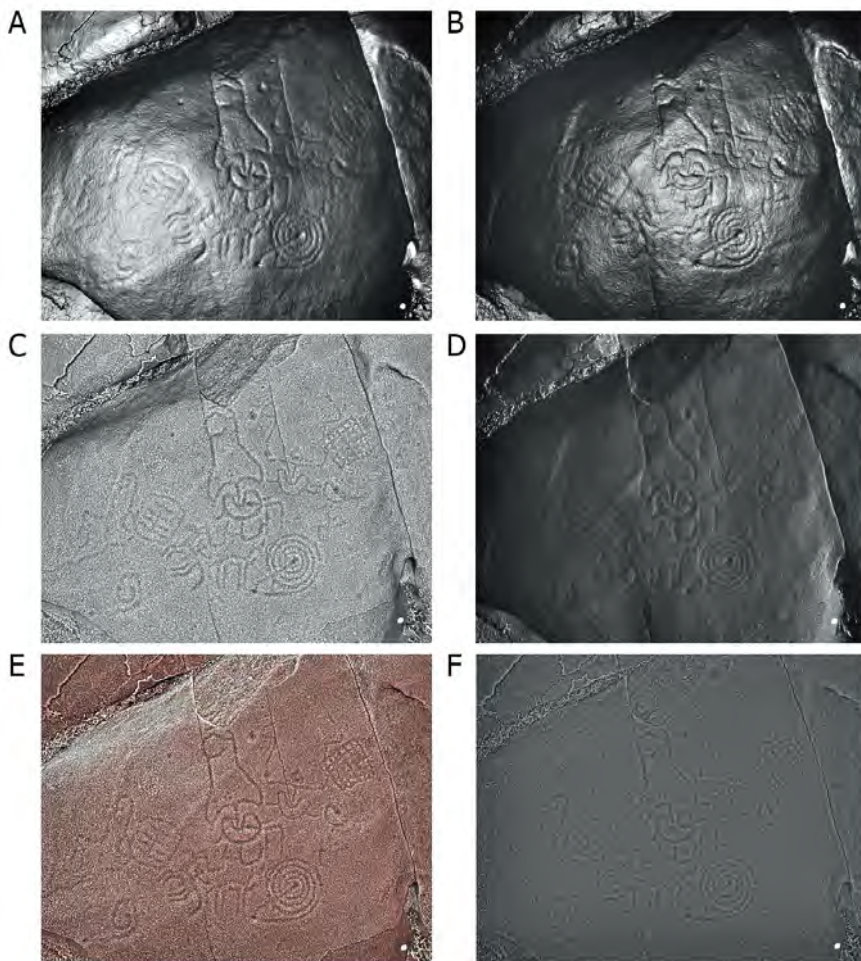


Figura 8. Distintas variables de configuración testeadas en *Meshlab*. (A) *Minnaert* con intensidad de iluminación alta. (B) *Minnaert* con baja intensidad. (C) *Lambertian Radiance Scaling*. (D) *Lambertian Radiance Scaling* con iluminación lateral. (E) *Lit Sphere Radiance Scaling*. (F) *Grey Descriptor*.

Los realces en los que los puntos de luz son configurables, como el renderizado *Minnaert* y *Lambertian Scaling*, son visualmente atractivos pero no son útiles para un análisis objetivo de los grabados. Por la contra, el realce *Lit Sphere Radiance Scaling* genera resultados de gran objetividad. Este renderizado puede observarse con colores

blancos y negros en las esferas de luz (Figura 9-A) para mejorar el contraste de los grabados. Por otro lado, en la figura 9-B, se puede observar el mismo renderizado después de la aplicación previa del suavizado de la malla Laplacian Smooth. Se puede observar que el modelo suavizado mantiene los detalles del grabado que el modelo original, eliminando parte del ruido. Este efecto positivo es más relevante cuando el soporte sobre el que se colocan los grabados es de grano grueso, como se muestra en las figuras 9-C y 9-D (Caso 2). Cuando los grabados son sinuosos, como en las figuras 9-E y 9-F (Caso 3), o la malla 3D no tiene resolución suficiente (Caso 6), no es aconsejable aplicar este suavizado porque puede generar que algunos grabados no sean registrados.



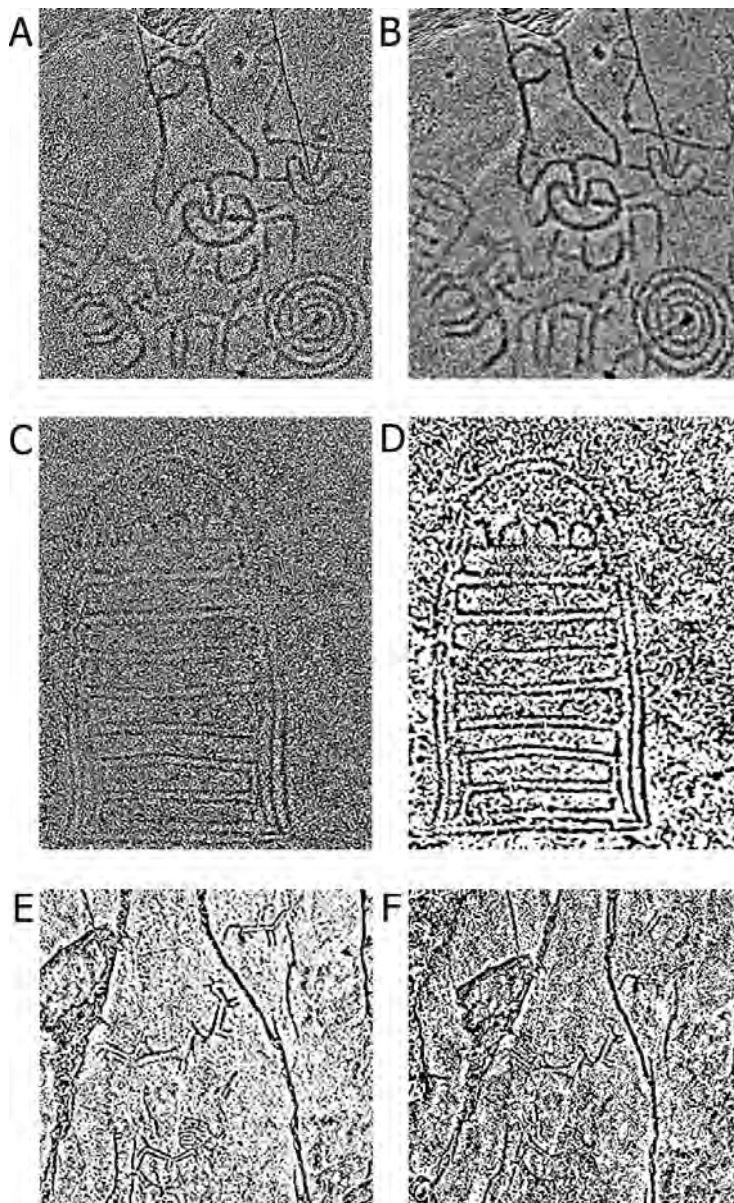


Figura 9. *Lit Sphere Radiance Scaling* con negro y blanco como *Lit Spheres* (A) Modelo 3D realzado original. (B) Modelo 3D suavizado y realzado. (C) *Bitmap* del modelo original del Caso 2 (D) *Bitmap* del modelo suavizado del Caso 2. (E) *Bitmap* del modelo original del Caso 3. (F) *Bitmap* del modelo suavizado del Caso 3.

Las figuras 10-A y 10-B muestran las calidades de exportación altas y bajas del *Snapshot* en *Meshlab*. En la opción de baja calidad, los grabados se aprecian mejor.

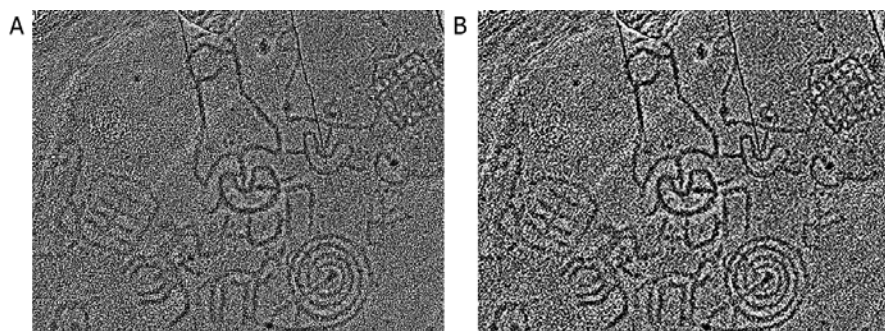


Figura 10. Distintas calidades de exportación de capturas 2D en *Meshlab*.
(A) Calidad alta (B) Calidad baja.

8.3.3. Post-tratamiento digital

Las Figuras 11-A y 11-B muestran los resultados del mapa de bits del Caso 1 y del Caso 4. Se utilizaron las capturas de baja calidad de la malla suavizada, ya que este fue el flujo de trabajo que ofreció los mejores resultados. En particular, el método de generación de mapa de bits que implica una bajoexposición y una sobreexposición de la captura, se puede aplicar con mayor o menor agresividad, como se muestra en las Figuras 11-C y 11-D para el Caso 5. Aunque la Figura 11-D presenta menos ruido, los grabados se definen mejor en Figura 11-C, este aspecto introduce cierta subjetividad al proceso.

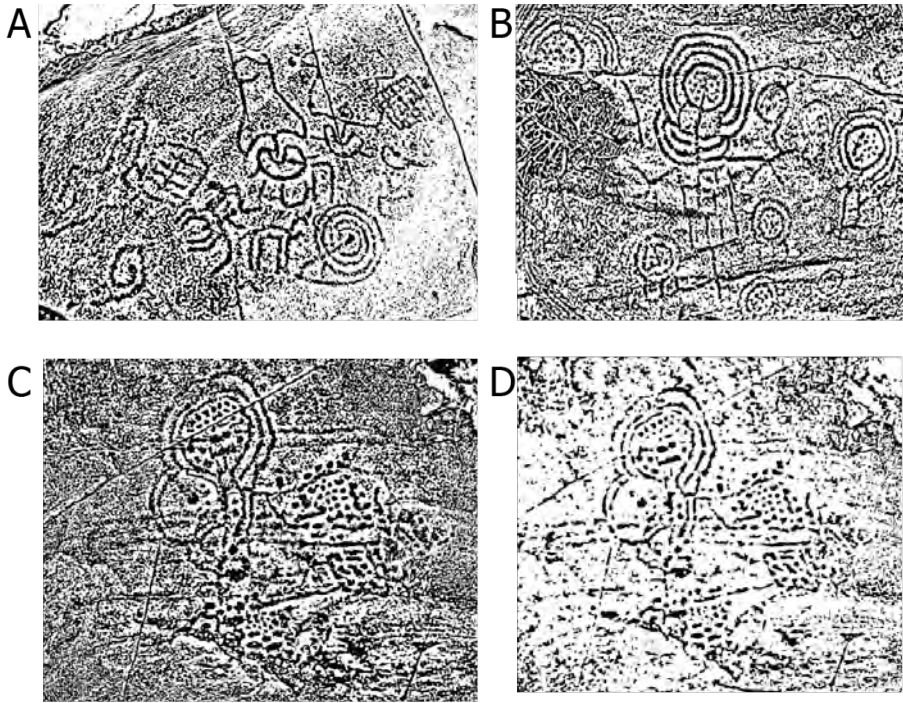


Figura 11. *Bitmaps* resultantes. (A) Caso 1. (B) Caso 4. (C) *Bitmap* de alta densidad del Caso 5. (D) *Bitmap* de baja densidad del Caso 5.

8.3.4. Vectorización automática

La vectorización automática del mapa de bits se genera fácilmente después de los tratamientos anteriores. El mapa de bits y la imagen vectorizada del Caso 6 se muestran en las Figuras 12-A y 12-B. Al realizar la vectorización automática en los mapas de bits en lugar de en una imagen con una resolución radiométrica más alta, la subjetividad intrínseca a este proceso se elimina por completo.

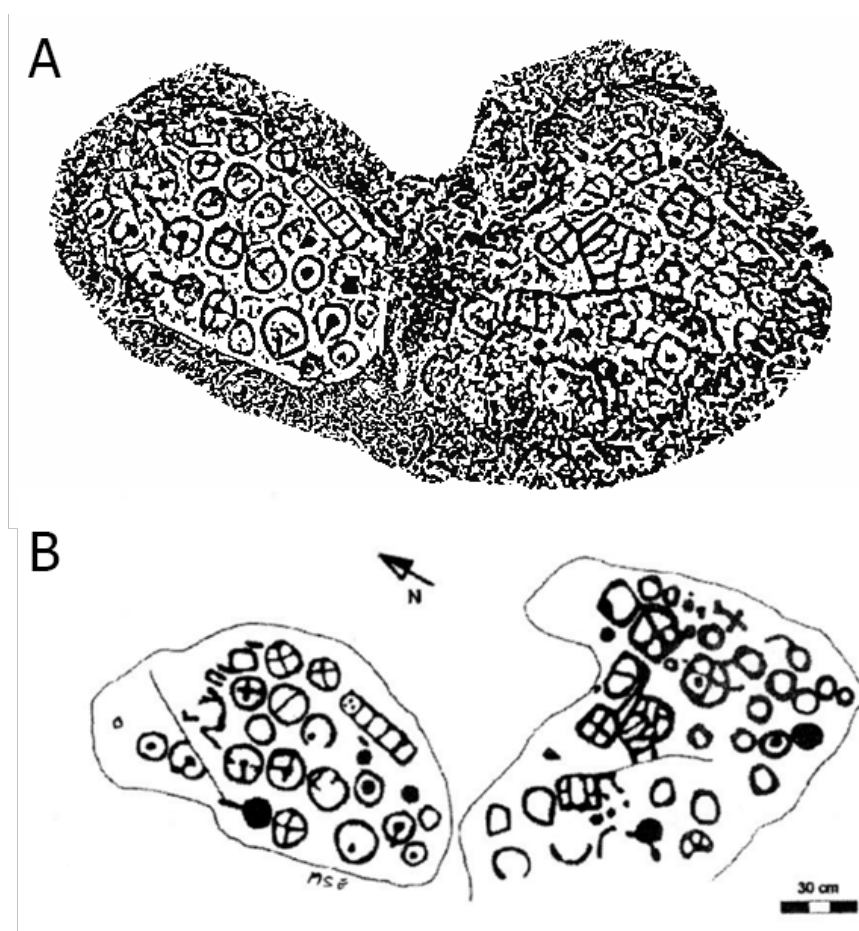


Figura 12. Caso 6, calcos vectoriales. (A) A partir de fotogrametría *SfM*. (B) A partir de técnicas tradicionales (Mañana-Borrazás & Santos-Estévez, 2002).

Incluso en este caso, donde las fotos se tomaron con una cámara de un *SmartPhone*, en comparación con una documentación previa de este ejemplo de arte rupestre (Mañana-Borrazás & Santos-Estévez, 2002) los resultados se muestran similares. Los resultados de otros ejemplos de arte rupestre documentados en este estudio se muestran en la Figura 13 (Caso 6).

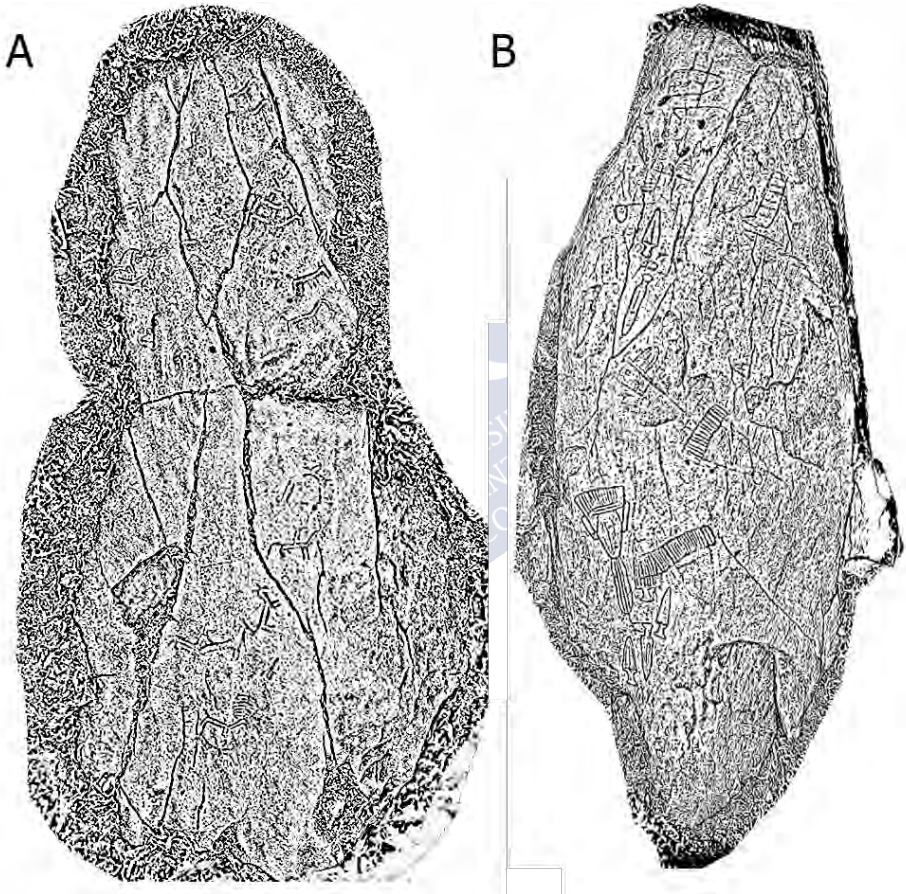
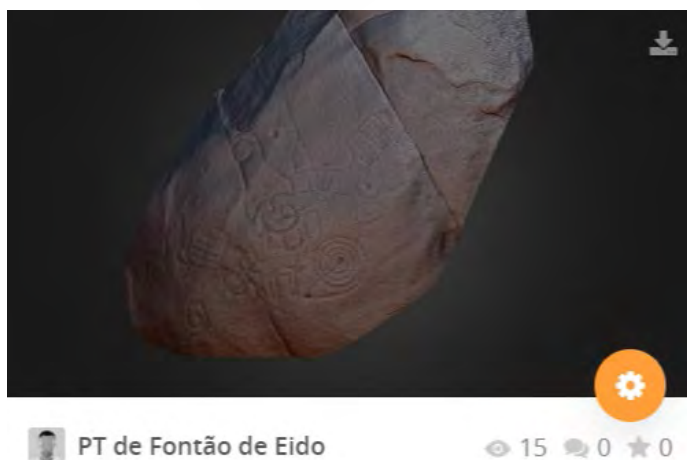


Figura 13. Resultados de la vectorización. (A) Caso 3. (B) Caso 7.

8.3.5. Publicación online

A pesar de los intentos de preservar las mismas perspectivas durante el proceso de obtención de las instantáneas, se observan pequeñas diferencias, como las que se encuentran entre las Figuras 9-A y 9-B. Estos cambios sutiles en la perspectiva hacen que la espiral en la parte inferior derecha parezca ser circular en la Figura 9-A y elíptica en la Figura 9-B. Las figuras 12-A y 12-B muestran planos blancos de roca con diferentes orientaciones, lo que indica que las rocas en estas figuras pueden ser malinterpretadas por no mostrarse en sus verdaderas perspectivas. Esta diferencia indica que después de la aplicación de realces, el formato 2D en el cual se exportan los resultados, sigue teniendo el mismo problema que tienen los métodos tradicionales, relacionado con el error producido cuando la información 3D se proyecta sobre un formato 2D. Sin embargo, los resultados de los modelos realizados se pueden observar directamente en formato 3D en plataformas como *Sketchfab*. Este modo de difusión permite el estudio de grabados sin esos errores intrínsecos a la proyección. Los modelos 3D realizados de los casos de estudio de este capítulo se pueden observar en los siguientes enlaces:

Caso 1. PT de Fontão do Eido: <https://skfb.ly/6CyoW>



Caso 2. PT de Pedra da Grada: <https://skfb.ly/6E7HX>



Caso 3. PT da Pedra da Loba: <https://skfb.ly/6E7EX>



Caso 4. PT da Peneda Negra: <https://skfb.ly/6E7Ew>



Caso 5. PT dos Buracos: <https://skfb.ly/6Ew7R>



Caso 6. PT de A Fieiteira: <https://skfb.ly/6Ewrp>



Caso 7. PT de O Castriño de Conxo: <https://skfb.ly/6EzFV>



A pesar de la limitación de 50 Mb, utilizando el formato *STL* y la compresión *RAR* de alta calidad, es posible cargar mallas de más de 2 millones de triángulos que permiten su estudio eficiente.

8.3.6. Formato 2D vs 3D

A medida que se analizan los resultados finales, el proceso de publicación en 2D y 3D de bajo coste, fue ejecutado con éxito por perfiles no expertos en la documentación y la difusión de varios ejemplos de este fenómeno del patrimonio. El modo de estudio en 3D y su difusión es más simple que el modo de difusión en 2D y los resultados son más completos y sin errores de proyección.

8.4. Conclusiones

El uso de técnicas avanzadas de adquisición de datos 3D, realces digitales y tratamientos de vectorización automática, que son accesibles para perfiles no expertos debido a la facilidad y bajo coste de su ejecución, permite la documentación geométrica de los sutiles grabados del arte rupestre “Atlántico”, de un modo masivo y con suficiente poder analítico para obtener interpretaciones objetivas de los mismos. Además, después de analizar ampliamente los resultados del *software* fotogramétrico así como de las opciones de post-proceso disponibles, se proporciona un flujo de trabajo con *software* de licencia gratuita, optimizado para lograr la mayor facilidad de uso y objetividad en las interpretaciones de grabados rupestres.

Con respecto al análisis de las diferentes opciones de configuración de los renderizados de realce, se muestra cómo a partir de un *software* ampliamente utilizado como *Meshlab*, es posible obtener resultados visualmente atractivos que son similares a los obtenidos a partir de fotografías e iluminación artificial mediante los renderizados afectados por el ángulo de iluminación. El uso de renderizados afectados por la iluminación elimina la necesidad de realizar fotografía nocturna. Además, las posibilidades de iluminación artificial en los modelos 3D son más flexibles que las que se presentan in situ. Por otro lado, los renderizados que no se ven afectados por la iluminación proporcionan resultados objetivos para las

interpretaciones del grabado. En concreto el renderizado *Lit Sphere Radiance Scaling* ofrece los mejores resultados con esferas en blanco y negro. La exportación de baja calidad de capturas y el suavizado de la malla mejoró significativamente los resultados en la mayoría de casos, por lo cual estos procesos pueden ser recomendados para optimizar los resultados, no obstante, el efecto de suavizado es contraproducente en grabados muy sutiles o con mallas triangulares de baja resolución. Por otro lado, destacar que una interpretación mínima por parte del técnico en la aplicación del tratamiento de “caja oscura” para la generación del mapa de bits sigue siendo necesaria.

Finalmente, en este estudio, se evidencia que el formato 2D puede producir errores de interpretación de los diseños rupestres. Debido a estos errores potenciales y debido a una mínima e inevitable interpretación necesaria por parte del técnico en la fase de generación del mapa de bits, se puede concluir que la tendencia debe avanzar hacia el estudio directo de los grabados a partir del modelo 3D realizado. Este es el modo más completo y objetivo que tienen los técnicos para interpretar este fenómeno, evitando el error de proyección de información sobre un formato 2D. Además, plataformas como *Sketchfab* permiten la difusión mundial de los modelos 3D realizados de una manera visualmente atractiva y moderna. Estas herramientas de difusión online junto con los métodos de adquisición de modelos 3D como la fotogrametría *SfM* simple y de bajo coste, son un conjunto idóneo para la documentación masiva de este patrimonio en riesgo.



9. CONCLUSIONES

En el primer capítulo de estudio de modelado 3D de fachadas históricas mediante fotogrametría *SfM* (*Capítulo 1*), las principales conclusiones alcanzadas fueron:

1. El modelado 3D de fachadas de edificios históricos mediante fotogrametría terrestre puede realizarse de forma masiva, a bajo coste, con agilidad y con suficiente precisión para múltiples aplicaciones, como muestran los resultados del levantamiento de las fachadas de los casos estándar resueltos en este capítulo (Caso 1 y 2).
2. La fotogrametría *SfM* es una técnica capaz de adaptarse a las geometrías complejas habitualmente presentes en el patrimonio arquitectónico de cascos históricos, como evidencian los resultados obtenidos en el caso 3, “calle estrecha” y en el caso 4 “fachada con soportales”. La disposición fotográfica habitual para el establecimiento de la red fotogramétrica no era aplicable en estos casos, por lo que ha sido necesario aportar soluciones adaptadas a las geometrías complejas presentes, obteniendo esquemas de trabajo extrapolables a ejemplos de similares características. Esta adaptación de la red fotogramétrica, se basa en la combinación de imágenes oblicuas y perpendiculares, evidenciando que no solo es posible la combinación de las mismas, sino recomendable para obtener modelos 3D geométrica y visualmente correctos.

3. El *software* empleado (*Agisoft PhotoScan*) permite utilizar preselección de imágenes en los emparejamientos, lo que agiliza notablemente los tiempos de procesamiento inicial y facilita la correcta orientación de las imágenes, siempre y cuando la toma se realice de forma correlativa, es decir, que la colección de imágenes sea una concatenación de imágenes solapadas, cuya cadena de enlace no se rompa en toda la toma fotográfica.
4. La utilización de dispositivos de estabilización de la toma fotográfica como trípodes, mengua en gran medida el rendimiento de la técnica especialmente en casos complejos donde los espacios limitan el posicionamiento estable del mismo. En su lugar, si se prescinde de su utilización, es posible obtener modelos 3D de precisión mediante una toma de fotos a mano alzada, de un modo más ágil, con mayor número de capturas y por lo tanto, con mayor solape y que mejora los resultados tanto geométricos como visuales.
5. La utilización de dispositivos de elevación de la toma fotográfica como pértigas o *RPAS*, no es un requisito indispensable para obtener datos métricos de precisión de fachadas históricas de varias alturas, ya que se han obtenido resultados satisfactorios en estos casos empleando exclusivamente imágenes tomadas con medios terrestres.
6. El uso de cámaras profesionales no es un requisito indispensable para obtener mediante fotogrametría *SfM*, modelos 3D de suficiente calidad geométrica y visual para documentaciones patrimoniales, ya que se han obtenido resultados satisfactorios en uno de los casos de este estudio a partir de colecciones de imágenes tomadas con la cámara integrada en un *SmartPhone*.
7. El sistema y escalado de la escena mediante una o varias medidas de referencia en lugar de mediante puntos de coordenadas conocidas, agiliza notablemente este proceso, proporcionando resultados con suficiente precisión para múltiples aplicaciones.

En el segundo capítulo de estudio de comparación de *software desktop* profesional y *software* gratuito *cloud computing* en el modelado 3D de edificios históricos (*Capítulo II*), las principales conclusiones alcanzadas fueron:

8. La comparación entre *software desktop* profesional y el *software cloud computing* de uso gratuito muestra resultados próximos en términos de precisión geométrica y calidad visual, y suficientes para considerarse ambas opciones válidas para múltiples tareas de documentación de elementos patrimoniales.
9. El *software* de computación “en la nube” es accesible en costes y obtiene un gran rendimiento en tiempos, tiene un flujo de trabajo simple, no es necesario aprendizaje previo para su utilización y no requiere un desembolso grande en equipos informáticos al procesar los resultados “en la nube”, por lo que se adapta a la perfección, a las tareas documentales cotidianas de los profesionales del patrimonio arquitectónico no especialistas en fotogrametría.
10. Para garantizar la orientación de los procesados fotogramétricos *SfM* en *software cloud computing*, es conveniente que la toma sea correlativa. Por otro lado, las variables de configuración del emparejamiento entre imágenes que permite el *software desktop*, permiten obtener correctas orientaciones de imágenes solapadas de modo no correlativo, no obstante esto ralentiza el procesado y aumenta la probabilidad de obtener una orientación de imágenes fallida.
11. A pesar de que mediante la utilización de *software* externo es posible obtener productos secundarios como ortofotos o modelados *BIM* a partir de modelos 3D obtenidos con *software* de computación “en la nube”, la utilización de *software* profesional de computación local, el cual integra esta posibilidad y ofrece más variables de configuración en este sentido, sería recomendable si se requieren dichos productos.

12. El parámetro de configuración del procesado fotogramétrico *SfM* bajo la denominación de “calidad”, común a todas las opciones de *software SfM*, siendo configurable de modo independiente en distintas fases del procesado en *software desktop*, y constante en *software cloud computing*, es el parámetro de mayor influencia en la calidad geométrica y visual de los resultados y tiempos de ejecución del procesado fotogramétrico.
13. La comparación de resultados de las opciones de *software desktop*, muestra que la calidad de los resultados y el rendimiento en tiempos es similar para ambas. A pesar de que las diferencias entre ambos *software* varían con el desarrollo de actualizaciones de versión, cabe destacar varias diferencias que se mantienen constantes: *PhotoScan* presenta un procesado *SfM* más configurable que *Pix4D*, mientras que este, muestra un entorno de trabajo visualmente más atractivo e intuitivo. En la generación de ortofotos y texturas, es donde encontramos las mayores diferencias de resultados. *PhotoScan* permite un mayor grado de configuración del procesado permitiendo generar ortomosaicos y texturas con distintos modos de mapeado, mientras que *Pix4D* está más limitado en este aspecto.
14. La continua progresión de los algoritmos del *software SfM* y de las capacidades de computación de los ordenadores y servicios de computación “en la nube” hacen de la fotogrametría una técnica “viva”, permitiendo que una misma colección de imágenes tomadas en un momento concreto, pueda ser procesada en el futuro con mejores capacidades de computación y algoritmos más eficientes. Por ello, debe reflexionarse sobre la toma de datos fotográficos en bruto susceptibles de utilizarse para procesado fotogramétrico como entregable principal en los trabajos, en lugar del modelo 3D en sí mismo, ya que en el futuro, la misma colección de imágenes

dará lugar a un modelo 3D mejor al que se puede generar o manejar con los medios actuales.

En el tercer capítulo de estudio de comparación de *TLS* y fotogrametría *SfM* para el modelado 3D de arte rupestre y la aplicación del realce *Radiance Scaling Shader* para la detección de grabados (*Capítulo III*), las principales conclusiones alcanzadas fueron:

15. La comparación de precisión geométrica muestra que las diferencias entre ambas mallas son menores de 2 mm. Por lo tanto, la metodología fotogramétrica simple utilizada puede considerarse cercana en precisión al *TLS* para la tarea de modelado 3D de petroglifos de geometrías complejas.
16. Mediante *TLS* y mediante fotogrametría *SfM* es posible obtener modelos 3D de suficiente calidad geométrica para realizar un análisis objetivo de inscripciones de arte rupestre basado en la utilización de los filtro de *Radiance Scaling* de *Meshlab*.
17. La fotogrametría se adapta en mayor grado que el *TLS* a la tarea de documentación de elementos de arte rupestre con morfologías complejas, obteniendo resultados de mayor calidad geométrica y visual con mejor rendimiento en tiempos y costes y mayor accesibilidad técnica. Los resultados de la fotogrametría son precisos, sin huecos, con mejores texturas que las obtenidas con *TLS*. Además permite trabajar fácilmente a distintas resoluciones sobre el mismo elemento en función del grado de definición necesaria para cada zona permitiendo un ahorro de tiempo notable en zonas con pocos detalles o secundarias. Con la metodología *TLS* es posible trabajar también a múltiples resoluciones pero el ahorro de esfuerzo no es tan relevante. El tiempo de trabajo con fotogrametría *SfM* es menor que con el *TLS* y además varios equipos pueden trabajar simultáneamente a bajo coste, por todo ello es una técnica más operativa en labores de prospección de arte rupestre donde es necesario documentar un número elevado de elementos dispersos en amplios territorios, en un periodo corto de tiempo.

Mediante fotogrametría es posible realizar la documentación de una gran cantidad de elementos en un solo día de campo a un coste muy bajo.

18. Esta técnica es accesible a perfiles no expertos con un mínimo de instrucción, como se muestra en el segundo experimento de este estudio, en el cual mediante colaboración altruista se obtuvieron resultados satisfactorios en la documentación geométrica de varias muestras de arte rupestre inéditas no documentadas hasta la fecha.
19. Los filtros *Radiance Scaling* aplicados sobre los modelos de *TLS* o fotogrametría, muestran un potencial en la detección de grabados mayor que las metodologías tradicionales, ya que se registraron grabados no documentados por estudios previos en este mismo petroglifo (*PT de Castriño de Conxo*). No obstante, conviene profundizar en las variables de configuración de estos tratamientos, lo cual se aborda en el siguiente capítulo.

En el cuarto capítulo de estudio de desarrollo de una metodología de trabajo simple y de bajo coste al alcance de múltiples perfiles para el modelado 3D y vectorización automatizada de grabados de arte rupestre “Atlántico” (*Capítulo IV*), las principales conclusiones alcanzadas fueron:

20. A partir de un flujo de trabajo de bajo coste y fácil implementación basado en la adquisición de modelos 3D mediante fotogrametría *SfM* y la aplicación sobre estos de tratamientos digitales de realce y vectorización automática, es posible obtener calcos virtuales de inscripciones en piedra como los petroglifos de arte rupestre “Atlántico” con un alto grado de objetividad.

21. El *software Meshlab*, aporta posibilidades de iluminación artificial sobre los modelos 3D más flexibles que las que permiten los yacimientos de arte rupestre in situ y elimina la visita nocturna a estos facilitando notablemente su estudio.
22. Mediante *Meshlab*, es posible utilizar renderizados de realce denominados “*Radiance Scaling Shader*”. Algunas opciones de este realce, permiten la variación de intensidad y dirección del punto de iluminación, mostrando resultados visualmente atractivos pero con cierta subjetividad; otras opciones de realces no se ven afectados por los cambios digitales de iluminación, lo que proporciona resultados más objetivos. En concreto el denominado como “*Lit Sphere Radiance Scaling*” obtiene grandes resultados en la detección de grabados. Además, la utilización de colores negro y blanco sólidos en las esferas de este renderizado, genera un mejor contraste en los resultados y proporciona una captura en blanco y negro fácilmente interpretable por los vectorizadores automáticos.
23. El suavizado de la malla habitualmente mejora los resultados en la detección de grabados, no obstante, en grabados muy sutiles o en mallas de triángulos de baja densidad, el efecto de suavizado puede ser contraproducente, provocando que se “pierda” el grabado, por lo que se debe considerar su utilización en cada caso.
24. La calidad en la exportación de las capturas de los modelos realizados, tiene influencia en los resultados, siendo habitualmente más fácilmente detectables los grabados en las capturas exportadas en baja resolución, aunque en grabados poco profundos, esto no tiene por qué ser así. Por lo tanto, es recomendable exportar las capturas en distintas resoluciones con el objetivo de realizar un análisis lo más preciso posible de los mismos.

25. En la fase de preparación para la vectorización de calcos virtuales a partir de las capturas obtenidas sobre los modelos realzados, se realiza la subexposición y sobreexposición de la imagen. En este paso tiene influencia la interpretación del técnico en el grado de subexposición y sobreexposición de las capturas, no obstante esta es la última fase del flujo de trabajo, antes de la vectorización automática, por lo que su influencia en el resultado no es de gran relevancia.
26. Los resultados de este estudio evidencian que el formato 2D producen errores de interpretación de los grabados, por ello se debe avanzar hacia el estudio directamente sobre los modelos 3D realzados, ya que esta es la forma más completa y objetiva que tienen los técnicos para realizar las interpretaciones de los mismos, evitando errores intrínsecos a la proyección de la información tridimensional sobre un formato bidimensional. Esto es posible actualmente gracias a plataformas online como *Sketchfab* que permiten de un modo abierto, visualmente atractivo y moderno, la difusión de modelos 3D con renderizados de realce similares a los aplicados en el *software Meshlab*.

Por tanto, la principal conclusión de esta tesis es que la fotogrametría *SfM* es accesible a perfiles no técnicos como arqueólogos, historiadores o incluso aficionados al patrimonio, permitiendo obtener modelos 3D de gran calidad geométrica y visual. Permite además obtener un gran rendimiento en tiempos y costes, por lo que cuenta con un gran potencial en la documentación geométrica tanto del patrimonio arquitectónico como arqueológico.

En esta tesis, se definen asimismo flujos de trabajo sencillos que permiten la obtención de modelos 3D de calidad, en ocasiones, en situaciones extremas donde la aplicación de las metodologías de toma de imagen estandarizadas no es aplicable, como en cascos históricos o petroglifos de geometrías complejas donde esta técnica mejora los resultados y rendimientos de metodologías a priori más avanzadas como el *TLS* en todos los parámetros analizados.

Además, se define un flujo de trabajo completo basado en la aplicación de fotogrametría *SfM*, renderizados de realce y vectorización automática, mediante *software* gratuito en todo el procesado, que permite documentar un número elevado de petroglifos en un periodo corto de tiempo y además es capaz de registrar de modo objetivo grabados de arte rupestre “Atlántico” que los métodos tradicionales no consiguen detectar.





10. BIBLIOGRAFÍA

- Abd Elbasit, M. A. M., Anyoji, H., Yasuda, H., & Yamamoto, S. (2009). Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7263>
- Aguilar, M. A., Aguilar, F. J., & Agüera, F. (2005). Mapping small areas using a low-cost close range photogrammetric software package with aerial photography. *The Photogrammetric Record*, 20(112), 335–350.
- Al-kheder, S., Al-shawabkeh, Y., & Haala, N. (2009). Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry. *Journal of Archaeological Science*, 36(2), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.10.009>
- Albertz, J., Wiedemann, A. (1996). From Analogue To Digital Close-Range Photogrammetry. *First Turkish-German Joint Geodetic Days*, 245–253. Retrieved from <http://www.alwie.net/lit/1stCR.pdf>
- Alby, E., Smigiel, E., Assali, P., Grussenmeyer, P., & Kauffmann-Smigiel, I. (2009). Low cost solutions for dense point clouds of small objects: Photomodeler Scanner vs. David Laserscanner. In *22nd CIPA Symposium*.
- Almagro, A. (2002). Simple Methods of Photogrammetry: Easy and Fast. In *XVIII International Symposium of CIPA, Potsdam, September 18-21, 2001*. (pp. 32–38).
- Altuntas, C., Yildiz, F., Karabork, H., Yakar, M., Karasaka, L., Konya-turkey, P. E., et al. (2007). Surveying and Documentation of Detailed Historical Heritage By Laser Scanning. *Heritage*, (October), 3–5.
- Apollonio, F. I., Gaiani, M., & Benedetti, B. (2012). 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: A framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area. *Journal of Archaeological Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.034>
- Arayici, Y. (2007). An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. *Automation in Construction*, 16(6), 816–829. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.02.008>

- Arcà, A. (2006). Rupestrian Archaeology: A methodological approach to the rock engravings of Valcamonica, 51–58.
- Arias, P., Ordóñez, C., Lorenzo, H., & Herraiez, J. (2006). Methods for documenting historical agro-industrial buildings: a comparative study and a simple photogrammetric method. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.09.002>
- Arias, P., Ordóñez, C., Lorenzo, H., Herraiez, J., & Armesto, J. (2007). Low-cost documentation of traditional agro-industrial buildings by close-range photogrammetry. *Building and Environment*, 42(4), 1817–1827. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.002>
- Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 83–94. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3)
- Barazzetti, L., Remondino, F., & Scaioni, M. (2009). Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects. In *Videometrics, Range Imaging, and Applications X*. <https://doi.org/10.1117/12.825638>
- Barazzetti, L., Binda, L., Scaioni, M., & Taranto, P. (2011). Photogrammetric survey of complex geometries with low-cost software: Application to the 'G1' temple in Myson, Vietnam. *Journal of Cultural Heritage*, 12(3), 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.12.004>
- Bayram, B., Nemli, G., Özkan, T., Oflaz, O. E., Kankotan, B., & Çetin, A. (2015). Comparison of laser scanning and photogrammetry and their use for digital recording of cultural monument case study: Byzantine land walls-istanbul. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5W3), 17–24. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-17-2015>
- Bea, M., & Angás, J. (2017). Geometric documentation and virtual restoration of the rock art removed in Aragón (Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 11, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.025>
- Bedate, A., Herrero, L. C., & Sanz, J. Á. (2004). Economic valuation of the cultural heritage: Application to four case studies in Spain. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2003.04.002>
- Beekmans, C., Schneider, J., Läbe, T., Lennefer, M., Stachniss, C., & Simmer, C. (2016). Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye cameras. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22), 14231–14248.
- Bellotti, F., Berta, R., Cardona, R., & De Gloria, A. (2011). An architectural approach to efficient 3D urban modeling. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 35(5), 1001–1012. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2011.07.004>

- Beraldin, J.-A., Blais, F., Boulanger, P., Cournoyer, L., Domey, J., El-Hakim, S. F., et al. (2000). Real world modelling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 55, 230–250. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(00)00013-7)
- Bhatla, A., Choe, S. Y., Fierro, O., & Leite, F. (2012). Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras. *Automation in Construction*, 28, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.003>
- Blais, F. (2004). Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*. <https://doi.org/10.1117/1.1631921>
- Boehler, W., & Marbs, A. (2004). 3D Scanning and Photogrammetry for Heritage Recording : a Comparison. *Proc. 12th International Conference on Geoinformatics, University of Gävle, Sweden*, (June), 7–9.
- Böhler, W., & Heinz, G. (1999). Documentation, surveying, photogrammetry. In *XVII CIPA Symposium. Recife, Olinda. Brazil* (Vol. 1).
- Bolognesi, M., Furini, A., Russo, V., Pellegrinelli, A., & Russo, P. (2015). TESTING THE LOW-COST RPAS POTENTIAL IN 3D CULTURAL HERITAGE RECONSTRUCTION. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Borysenko, D. V. (2018). USE OF MOBILE APPLICATIONS FOR DEVELOPING DESIGN-PRODUCTS IN TRAINING OF FUTURE EXPERTS IN DESIGN. *Information Technologies and Learning Tools*, 68(6), 47–63.
- Boukerch, I., Takarli, B., Mahmoudi, R., Tellai, S., & Chadli, D. (2016). APPLICATION OF DIGITAL TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY IN ARCHITECTURAL CONSERVATION: THE MOSQUE OF ABDULLAH IBN SALAM OF ORAN. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b5-989-2016>
- Bradley, R. (2002). Access, Style and Imagery : the Audience for Prehistoric Rock Art in Atlantic Spain and Portugal, 4000-2000 Bc. *Oxford Journal of Archaeology*, 21(3), 231–247. <https://doi.org/10.1111/1468-0092.00160>
- Bradley, R., & Fábregas-Valcarce, R. (1998). Crossing the border: contrasting styles of rock art in the prehistory of north-west Iberia. *Oxford Journal of Archaeology*, 17(3), 287–308. <https://doi.org/10.1111/1468-0092.00064>
- Bradley, R., Criado-Boado, F., & Valcarce, R. F. (1994). Rock art research as landscape archaeology: a pilot study in Galicia, north-west Spain. *World Archaeology*, 25(3), 374–390. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00438243.1994.9980252>

- Brown, D. C. (1972). Close Range Calibration.
- Brumana, R., Oreni, D., Cuca, B., Binda, L., Condoleo, P., & Triggiani, M. (2014). Strategy for Integrated Surveying Techniques Finalized to Interpretive Models in a Byzantine Church, Mesopotam, Albania. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(6), 886–924. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.756077>
- Buhigas-Sobrino, R. (2000). *Corpus Petroglyphorum Gallaeciae* (Do Castro).
- Bui, Q. B., Morel, J. C., Venkatarama Reddy, B. V., & Ghayad, W. (2009). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44(5), 912–919. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.001>
- Butler, J., Lane, S., Chandler, J., & Porfiri, E. (2002). Through-Water Close Range Digital Photogrammetry in Flume and Field Environments. *The Photogrammetric Record*, 17(99), 419–439. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00196>
- Campana, S., & Remondino, F. (2007). Fast and detailed digital documentation of archaeological excavations and heritage artifacts. *Layers of Perception: Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany, April 2-6, 2007*, 36–42. Retrieved from https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/bitstream/handle/10900/61506/18_Campana_Remondino_CAA_2007.pdf?sequence=2
- Campana, S., & Remondino, F. (2008). Fast and detailed digital documentation of archaeological excavations and heritage artifacts. *Layers of Perception: Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany, April 2-6, 2007*, 36–42.
- Carnevali, L., Ippoliti, E., Lanfranchi, F., Menconero, S., Russo, M., & Russo, V. (2018). CLOSE-RANGE MINI-UAVS PHOTOGRAMMETRY FOR ARCHITECTURE SURVEY. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 422, 217–224.
- Caro, J. L., & Hansen, S. (2015). De la fotogrametría a la difusión del patrimonio arqueológico mediante game engines : Menga un caso de estudio. *VAR. Virtual Archaeology Review*, 6(12), 58. <https://doi.org/10.4995/var.2015.4159>
- Carrera Ramírez, F., Costas Goberna, F. J., Peña Santos, A. de la, & Rey García, J. M. (1994). El arte rupestre galaico: una reflexión crítica sobre el presente y una propuesta para el futuro. *Trabajos de Prehistoria*, 51, N°2, (c), 41–54.

- Carrero-Pazos, M., Vilas-Estévez, B., & Vázquez-Martínez, A. (2012). Digital imaging techniques for recording and analysing prehistoric rock art panels in Galicia (NW Iberia). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, (July), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.11.003>
- Carrero-Pazos, M., Vilas-Estévez, B., & Vázquez-Martínez, A. (2018). Digital imaging techniques for recording and analysing prehistoric rock art panels in Galicia (NW Iberia). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 8(October 2017), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.11.003>
- Chandler, J. H., & Buckley, S. J. (2016). Structure from motion (SFM) photogrammetry vs terrestrial laser scanning. In *Geoscience Handbook 2016: AGI Data Sheets* (pp. 0–4). Retrieved from <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/21673%0Ahttps://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/21673>
- Chandler, J.H., Fryer, J., & Kniest, H. (2005). Non-invasive three-dimensional recording of aboriginal rock art using cost-effective digital photogrammetry. *Rock Art Research*, 22(2), 119–130. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Non-Invasive+Three-dimensional+recording+of+aboriginal+rock+art+using+cost-effective+digital+photogrammetry#0>
- Chandler, Jh, Fryer, J., & Jack, A. (2005). Metric capabilities of low cost digital cameras for close range surface measurement. *The Photogrammetric Record*, 17(March), 1–16. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2005.00302.x>
- Chandler, Jim,, & Fryer, J. (2013). AutoDesk 123D Catch : How accurate is it? *Geomatics World*, (January 2013), 28–30.
- Chandler, Jim. (1999). Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(1), 51–63. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199901\)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199901)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H)
- Chandler, Jim H., Bryan, P., & Fryer, J. G. (2007). The development nd application af a simple methodology for recording rock art using consumer-grade digital cameras. *Photogrammetric Record*, 22(117), 10–21. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2007.00414.x>
- Chandler, Jim H, Buffin-Bélanger, T., Rice, S., Reid, I., & Graham, D. J. (2003). The accuracy of a river bed moulding/casting system and the effectiveness of a low-cost digital camera for recording river bed fabric. *The Photogrammetric Record*, 18(103), 209–223.
- Chandran, V., Carswell, B., Boashash, B., & Elgar, S. (1997). Pattern recognition using invariants defined from higher order spectra: 2-D image inputs. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(5), 703–712. <https://doi.org/10.1109/83.568927>

- Chang, T. C., Milne, S., Fallon, D., & Pohlmann, C. (1996). Urban heritage tourism: The Goba-Local Nexus. *Annals of Tourism Research*. [https://doi.org/10.1016/0160-7383\(95\)00064-X](https://doi.org/10.1016/0160-7383(95)00064-X)
- Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: Two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, 38(3), 697–710. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.10.022>
- Chidburee, P., Mills, J. P., Miller, P. E., & Fieber, K. D. (2016). TOWARDS A LOW-COST, REAL-TIME PHOTOGRAMMETRIC LANDSLIDE MONITORING SYSTEM UTILISING MOBILE AND CLOUD COMPUTING TECHNOLOGY. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Cirulis, A., Paolis, L. T. De, & Tutberidze, M. (2015). Virtualization of Digitalized Cultural Heritage and Use Case Scenario Modeling for Sustainability Promotion of National Identity. In *Procedia Computer Science* (Vol. 77, pp. 199–206). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.384>
- Clarke, T. A., & Fryer, J. G. (1998). The Development of Camera Calibration Methods and Models. *The Photogrammetric Record*, 16(91), 51–66. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00113>
- Clogg, P., Díaz-Andreu, M., & Larkman, B. (2000). Digital Image Processing and the Recording of Rock Art. *Journal of Archaeological Science*, 27(9), 837–843. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0522>
- Croci, G., Villa, F. G., Carluccio, G., De Vito, S., & Viskovic, A. (1997). Repair of the grand staircases in the monastery of San Martin Pinario in Santiago de Compostela and in the Colegio del Cardenal in Monforte de Lemos. In *International Series on Advances in Architecture* (Vol. 3).
- Cuevillas, F. L. (1951). La clasificación tipológica del arte rupestre del noroeste hispánico y una hipótesis sobre la cronología de alguno de sus tipos. *Zephyrus*, 2.
- D.D. Lichti, S. J. Gordon, M. P. Stawart, J. Franke, M. T. (2002). Comparison of digital photogrammetry and laser scanning, 00(January 2002), 39–44.
- Dai, F., & Lu, M. (2010). Assessing the Accuracy of Applying Photogrammetry to Take Geometric Measurements on Building Products. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(2), 242–250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000114)
- Deng, G., & Faig, W. (2001). An evaluation of an off-the-shelf digital close-range photogrammetric software package. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(2), 227–233.

- Deseilligny, M. P., & Clery, I. (2011). APERO, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Sets of Images. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(5-W16), 269–276. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-269-2011>
- Desmond, L. G., & Bryan, P. G. (2003). Recording architecture at the archaeological site of Uxmal, Mexico: A historical and contemporary view. *Photogrammetric Record*. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.t01-1-00013>
- Di, L., Yue, P., Ramapriyan, H. K., & King, R. L. (2013). Geoscience data provenance: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(11), 5065–5072.
- Díaz-Andreu, M., Brooke, C., Rainsbury, M., & Rosser, N. (2006). The spiral that vanished: the application of non-contact recording techniques to an elusive rock art motif at Castlerigg stone circle in Cumbria. *Journal of Archaeological Science*, 33(11), 1580–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.02.010>
- Díaz-Guardamino, M., & D, W. (2013). Rock Art and Digital Technologies: The Application of Reflectance Transformation Imaging (RTI) and 3D Laser Scanning to the Study of Late Bronze Age Iberian Stelae. *MENGA 04, Journal of Andalusian Prehistory*.
- Domingo, I., Villaverde, V., López-Montalvo, E., Lerma, J. L., & Cabrelles, M. (2013). Latest developments in rock art recording: towards an integral documentation of Levantine rock art sites combining 2D and 3D recording techniques. *Journal of Archaeological Science*, 40(4), 1879–1889. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.11.024>
- Duane, C. B. (1971). Close-range camera calibration. *Photogramm. Eng*, 37(8), 855–866.
- Duffy, S., Bryan, P., Earl, G., Beale, G., Pagi, H., & Kotoula, E. (2013). *Multi-light Imaging for Heritage Applications*. *English Heritage*.
- Earl, G., Martinez, K., & Malzbender, T. (2010). Archaeological applications of polynomial texture mapping: Analysis, conservation and representation. *Journal of Archaeological Science*, 37(8), 2040–2050. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.03.009>
- El-Hakim, S., Beraldin, J. A., Gonzo, L., Whiting, E., Jemtrud, M., & Valzano, V. (2005). A Hierarchical 3D Reconstruction Approach for Documenting Complex Heritage Sites. *CIPA 2005 XX International Symposium*, (January 2016). Retrieved from <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/npsi/ctrl?action=rtdoc&an=5765060>
- Ergun, B. (2010). A novel 3D geometric object filtering function for application in indoor area with terrestrial laser scanning data. *Optics and Laser Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.12.006>

- Eulitz, M., & Reiss, G. (2015). 3D reconstruction of SEM images by use of optical photogrammetry software. *Journal of Structural Biology*, 191(2), 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2015.06.010>
- Fraser, C. S. (2013). Automatic Camera Calibration in Close Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(4), 381–388. <https://doi.org/10.14358/PERS.79.4.381>
- Fritsch, B., Rinner, E., & Graßhoff, G. (2013). 3D Models of Ancient Sundials: A Comparison. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(3), 361–373. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.2.3.361>
- Fujii, Y., Fodde, E., Watanabe, K., & Murakami, K. (2009). Digital photogrammetry for the documentation of structural damage in earthen archaeological sites: The case of Ajina Tepa, Tajikistan. *Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.11.012>
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362–1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2010). Towards internet-scale multi-view stereo. In *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 1434–1441). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5539802>
- Gaitatzes, A., Christopoulos, D., & Roussou, M. (2001). Reviving the past: cultural heritage meets virtual reality. In *Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage* (pp. 103–110). ACM.
- Ganovelli, F., Corsini, M., Pattanaik, S., & Di Benedetto, M. (2014). Introduction to Computer Graphics: A Practical Learning Approach.
- Genovese, R. (2005). Architectural, archaeologic and environmental restoration planning methodology: historic researches and techniques of survey aiming to conservation. *Proc. CIPA*. Retrieved from http://globalrestorationnetwork.org/uploads/files/LiteratureAttachments/39_architectural-archaeologic-and-environmental-restoration-planning-methodology.pdf
- Gil-Docampo, M., Ortiz-Sanz, J., Rego-Sanmartín, T., & Arza-García, M. (2019). A World Wide Web-Based Practice That Disseminates Photogrammetry: Inspiring Secondary Students to Pursue Geomatics Careers [Education]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(1), 86–97. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2876565>
- Gil Docampo, M. L., Ortiz Sanz, J., Rego Sanmartín, T., & Arza García, M. (2019). A World Wide Web-Based Practice That Disseminates Photogrammetry. Inspiring secondary students to pursue geomatics careers. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10347/18498>

- Godfrey, B., & Eveleth, H. (2015). An adaptable approach for generating vector features from scanned historical thematic maps using image enhancement and remote sensing techniques in a geographic information system. *Journal of Map and Geography Libraries*. <https://doi.org/10.1080/15420353.2014.1001107>
- Gonizzi Barsanti, S., Remondino, F., & Visintini, D. (2013). 3D SURVEYING AND MODELING OF ARCHAEOLOGICAL SITES – SOME CRITICAL ISSUES – *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, 145–150. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-145-2013>
- González-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Gómez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J., & Gutierrez-Alonso, G. (2009). 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art. *Sensors*, 9(2), 1108–1127. <https://doi.org/10.3390/s90201108>
- Grant, C. A., Johnston, M., Adam, C. J., & Little, J. P. (2019). Accuracy of 3D surface scanners for clinical torso and spinal deformity assessment. *Medical Engineering & Physics*, 63, 63–71.
- Greif, M., Greiner, C., Schenke, B., Schlichting, S., & Xu, Z. (2017). Collectivity in small systems - Initial state vs. final state effects, 25–35. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817205007>
- Grün, A., Remondino, F., & Zhang, L. I. (2004). Photogrammetric reconstruction of the great buddha of Bamiyan, Afghanistan. *Photogrammetric Record*. <https://doi.org/10.1111/j.0031-868X.2004.00278.x>
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtli, T., & Ringle, K. (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tachometry data for recording of cultural heritage buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, 213–218.
- Grussenmeyer, P., Alby, E., Landes, T., Koehl, M., Guillemin, S., Hullo, J. F., et al. (2012). Recording approach of heritage sites based on merging point clouds from high resolution photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-553-2012>
- Guarnieri, A., Milan, N., & Vettore, A. (2013). Monitoring of complex structure for structural control using terrestrial laser scanning (Tls) and photogrammetry. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.606595>
- Guidi, G., Beraldin, J. A., Ciofi, S., & Atzeni, C. (2003). Fusion of range camera and photogrammetry: A systematic procedure for improving 3-D models metric accuracy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.814282>

- Guidi, G., Beraldin, J.-A., & Atzeni, C. (2004). High-Accuracy 3-D Modeling of Cultural Heritage: The Digitizing of Donatello's "Maddalena." *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(3), 370–380. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.822592>
- Gutierrez-Heredia, L., Benzon, F., Murphy, E., & Reynaud, E. G. (2016). End to end digitisation and analysis of three-dimensional coral models, from communities to corallites. *PloS One*, 11(2), e0149641.
- Harmon, J. (2008). Using Decorrelation Stretch to Enhance Rock Art Images. *Society for California Archaeology*, 2008(11 November). Retrieved from http://www.petroglyphs.us/article_using_decorrelation_stretch_to_enhance_rock_art_images.htm
- Harris, C., & Stephens, M. (1988). A Combined Corner and Edge Detector. In *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988* (pp. 23.1-23.6). <https://doi.org/10.5244/C.2.23>
- Heipke, C., Madden, M., Li, Z., & Dowman, I. (2016). Theme issue "State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.006>
- Hollows, G., & Singer, S. (2009). Matching lenses and sensors. *Vision System Design*.
- Ioannidis, Charalabos, Soile, S., & Verykokou, S. (2016). Low cost technique for accurate geometric documentation of complex monuments by non-experts. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_6
- Ioannidis, Charalambos, Potsiou, C., Soile, S., & Badekas, J. (2000). Detailed 3d representations of archaeological sites. *IAPRS*, 33, B5.
- Jalandoni, A., Domingo, I., & Taçon, P. S. C. (2018). Testing the value of low-cost Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry for metric and visual analysis of rock art. *Journal of Archaeological Science: Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.12.020>
- Jamal, T., & Orbasli, A. (2008). Tourists in Historic Towns: Urban Conservation and Heritage Management. *APT Bulletin*. <https://doi.org/10.2307/4126422>
- Jiang, R., & Jauregui, D. V. (2007). A NOVEL NETWORK CONTROL METHOD FOR PHOTOGRAMMETRIC BRIDGE MEASUREMENT. *Experimental Techniques*. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2007.00150.x>
- Johnson, R. A., & Solis, A. (2016). Using photogrammetry to interpret human action on Neolithic monument boulders in Ireland's Cavan Burren. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.05.055>

- Karras, G. E., Mavromati, D., Madani, M., Mavrellis, G., Lymperopoulos, E., Kambourakis, A., & Gesafidis, S. (1999). Digital orthophotography in archaeology with low-altitude non-metric images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(5/W11), 8–11.
- Karsli, F., Ayhan, E., & Tunc, E. (2003). Building 3D photo-texture model integrated with GIS for architectural heritage conservation. In *Proceedings of the XIXth International Symposium, CIPA 2003: new perspectives to save cultural heritage: Antalya (Turkey), 30 September-04 October, 2003* (pp. 144–147). <https://doi.org/10.4271/2010-01-0065>
- Kaufmann, V., & Ladstädter, R. (2007). Application of Terrestrial Photogrammetry for Glacier Monitoring in Alpine Environments. *Change*, 2700, 813–818.
- Keypoints, S., & Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Koban, K. C., Leitsch, S., Holzbach, T., Volkmer, E., Metz, P. M., & Giunta, R. E. (2014). 3D-imaging and analysis for plastic surgery by smartphone and tablet: an alternative to professional systems? *Handchirurgie, Mikrochirurgie, Plastische Chirurgie: Organ Der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Fur Handchirurgie: Organ Der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Fur Mikrochirurgie Der Peripheren Nerven Und Gefasse: Organ Der V...*, 46(2), 97–104.
- Kvamme, K. L., Ernenwein, E. G., & Markussen, C. J. (2006). Robotic total station for microtopographic mapping: An example from the Northern Great Plains. *Archaeological Prospection*. <https://doi.org/10.1002/arp.270>
- Kwak, E., Detchev, I., Habib, A., El-badry, M., Asce, M., & Hughes, C. (2013). Precise Photogrammetric Reconstruction Using Model-Based Image Fitting for 3D Beam Deformation Monitoring. *ASCE Journal of Surveying Engineering*, Vol. 139(No. 3, August), 143–155. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000105](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000105).
- Lacroix, V. (2009). Raster-to-vector conversion: problems and tools towards a solution a map segmentation application. In *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Pattern Recognition, ICAPR 2009*. <https://doi.org/10.1109/ICAPR.2009.96>
- Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S., & Hanusch, T. (2007). Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science*, 34(10), 1702–1712. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.008>
- Lane, S. N., James, T. D., & Crowell, M. D. (2000). Application of Digital Photogrammetry to Complex Topography for Geomorphological Research. *The Photogrammetric Record*, 16(95), 793–821. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00152>

- Lato, M. J., Hutchinson, D. J., Gauthier, D., Edwards, T., & Ondercin, M. (2015). Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0051>
- Lavy, A., Eyal, G., Neal, B., Keren, R., Loya, Y., & Ilan, M. (2015). A quick, easy and non-intrusive method for underwater volume and surface area evaluation of benthic organisms by 3D computer modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(5), 521–531. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12331>
- Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M. L., & Allemand, P. (2007). Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. In *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.1595>
- Lerma-García, J. L. (2002). *Fotogrametría Moderna*.
- Lerma, José L., Navarro, S., Seguí, A. E., & Cabrelles, M. (2014). Range-based versus automated markerless image-based techniques for rock art documentation. *Photogrammetric Record*, 29(145), 30–48. <https://doi.org/10.1111/phor.12054>
- Lerma, José Luis, Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.011>
- Lerones, P. M., Fernández, J. L., Gil, Á. M., Gómez-García-Bermejo, J., & Casanova, E. Z. (2010). A practical approach to making accurate 3D layouts of interesting cultural heritage sites through digital models. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.02.007>
- Lewis-Williams, J. D., & Pager, H. (1990). Documentation, Analysis and Interpretation: Dilemmas in Rock Art Research. *The South African Archaeological Bulletin*, 45(152), 126. <https://doi.org/10.2307/3887979>
- Lodeiro-Pérez, J. M. (1995). *Aplicaciones de la topografía en la documentación arquitectónica y monumental*. (Colegio Of).
- López-Menchero Bendicho, V. M., Marchante Ortega, Á., Vincent, M. L., Cárdenas Martín-Buitrago, Á. J., & Onrubia Pintado, J. (2017). Uso combinado de la fotografía digital nocturna y de la fotogrametría en los procesos de documentación de petroglifos: el caso de Alcázar de San Juan (Ciudad Real, España). *Virtual Archaeology Review*, 8(17), 64–74. <https://doi.org/10.4995/var.2017.6820>

- López, J. A. B., Jiménez, G. A., Romero, M. S., García, E. A., Martín, S. F., Medina, A. L., & Guerrero, J. A. E. (2016). 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.022>
- Lowe, G. (2004). SIFT - The Scale Invariant Feature Transform. *International Journal*, 2, 91–110.
- Mahmoud, A., & Bennett, M. (2015). Introducing 3-dimensional printing of a human anatomic pathology specimen: potential benefits for undergraduate and postgraduate education and anatomic pathology practice. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*, 139(8), 1048–1051.
- Mañana-Borrazás, P., & Santos-Estévez, M. (2002). Arte rupestre no promontorio de Corme (Ponteceso). *Gallaecia*. Retrieved from <http://digital.csic.es/handle/10261/54851>
- Mark, R., & Billo, E. (2002). Application of Digital Image Enhancement in Rock Art Recording. *American Indian Rock Art*, 28, 121–128.
- Martínez-Rodríguez, S., Ortiz-Sanz, J., Gil-Docampo, M. L., & Rego-Sanmartín, M. T. (2013). Recording complex structures using close range photogrammetry: The cathedral of santiago de compostela. *Photogrammetric Record*, 28(144), 375–395. <https://doi.org/10.1111/phor.12040>
- Martínez-Rodríguez, S., Ortiz-Sanz, J., & Gil-Docampo, M. L. (2015). Geometric documentation of historical pavements using automated digital photogrammetry and high-density reconstruction algorithms. *Journal of Archaeological Science*, 53, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.10.003>
- Martínez, S. (2012). Fotogrametría terrestre de objeto cercano en la documentaci?n 3D: Revisi?n de casos. *Spanish Journal of Rural Development*, III(Special 3), 47–56. <https://doi.org/10.5261/2012.ESP3.06>
- Martínez, Santiago, Ortiz, J., Gil, M. L., & Rego, M. T. (2013). Recording complex structures using close range photogrammetry: The cathedral of santiago de compostela. *Photogrammetric Record*, 28(144), 375–395. <https://doi.org/10.1111/phor.12040>
- Mas Cornellà, M., Maura Mijares, R., Solís Delgado, M., & Pérez González, J. (2010). Reproducción digital, microfotografía estereoscópica y fotografía esférica aplicadas a la interpretación del arte rupestre prehistórico. *Cuadernos de Arte Rupestre: Revista Del Centro de Interpretación de Arte Rupestre de Moratalla*, ISSN 1699-0889, Nº. 6, 2013, Págs. 77-83, 6(6), 77–83. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5902470>

- Mason, S. (1994). Expert system based design of photogrammetric networks. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-000943695>
- Massow, A. (2015). Online image vectorizer. Retrieved from <https://www.vectorizer.io/>
- McPherron, S. P., Gernat, T., & Hublin, J. J. (2009). Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds. *Journal of Archaeological Science*, 36(1), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.028>
- Medici, P., & Rossi, G. (2015). Valcamonica 3.0: a new dimension in rock art recording. From tracing to structure from motion and postprocessing. *Research Perspectives On Prehistoric Art. Pre-Proceedings of the XXVI Valcamonica Symposium*, 9–12.
- Meijer, E. (2015). Structure from Motion as documentation technique for Rock Art. *Adoranten. International Rock Art Magazine*.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4), 473–486.
- Mills, H. (2015). Use of mobile devices for e-learning in geomatics. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(6), 5.
- Moneva Montero, M. (1993). Primeros sistemas de reproducción de arte rupestre en España. *Espacio, Tiempo y Forma. Serie I. Prehistoria y Arqueología*, 6, 413–441.
- Mosbrucker, A. R., Major, J. J., Spicer, K. R., & Pitlick, J. (2017). Camera system considerations for geomorphic applications of SfM photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(6), 969–986.
- Mudge, M., Malzbender, T., Schroer, C., Lum, M., & Schroer..., C. (2006). New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display. *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST2006)*, 195–200. <https://doi.org/10.2312/VAST/VAST06/195-202>
- Mudge, M., Schroer, C., Noble, T., Matthews, N., Rusinkiewicz, S., & Toler-Franklin, C. (2012). Robust and Scientifically Reliable Rock Art Documentation from Digital Photographs. In *A Companion to Rock Art*. <https://doi.org/10.1002/9781118253892.ch36>
- Murtiyoso, A., Koehl, M., Grussenmeyer, P., & Freville, T. (2017). ACQUISITION AND PROCESSING PROTOCOLS FOR UAV IMAGES: 3D MODELING OF HISTORICAL BUILDINGS USING PHOTOGRAMMETRY. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W2, 163–170. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-163-2017>

- Nikolov, I., & Madsen, C. (2016). Benchmarking close-range structure from motion 3D reconstruction software under varying capturing conditions. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 10058 LNCS, pp. 15–26). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_2
- Ordóñez, C., Martínez, J., Arias, P., & Armesto, J. (2010). Measuring building façades with a low-cost close-range photogrammetry system. *Automation in Construction*, 19(6), 742–749. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.03.002>
- Orteu, J. J. (2009). 3-D computer vision in experimental mechanics. *Optics and Lasers in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.11.009>
- Ortiz-Sanz, J., Gil-Docampo, M. L., Martínez-Rodríguez, S., Sanmartín-Rego, M. T., & Meijide-Cameselle, G. (2010). A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3158–3169. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.07.017>
- Ortiz-Sanz, J., Gil-Docampo, M., Meijide-Cameselle, G., Martínez-Rodríguez, S., & Rego-Sanmartín, M. T. (2011). Modelado 3D de una estación completa de petroglifos mediante escáner fotogramétrico de bajo coste: Pena de Chaos (Antas de Ulla, Lugo). *Férvades: Revista de Investigación*, 7, 115–120.
- Ortiz, J, Núñez, R., & Rego, T. (2005). Use of Volumetric Targets To Improve Accuracy in Architectural Photogrammetry At Low Cost. *Engineering*.
- Ortiz, Juan, Gil, M. L., Martínez, S., Rego, T., & Meijide, G. (2013). Three-dimensional Modelling of Archaeological Sites Using Close-range Automatic Correlation Photogrammetry and Low-altitude Imagery. *Archaeological Prospection*, 20(3), 205–217. <https://doi.org/10.1002/arp.1457>
- Otto, G., & Chau, T. (1989). “Region-growing” algorithm for matching of terrain images. *Image and Vision Computing*, 7(2), 83–94. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(89\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0262-8856(89)90001-2)
- Pappa, R. S., Giersch, L. R., & Quagliaroli, J. M. (2001). Photogrammetry of a 5m inflatable space antenna with consumer-grade digital cameras. *Experimental Techniques*. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2001.tb00028.x>
- PBA. (2018). PLAN BÁSICO AUTONÓMICO DE GALICIA. ANEXO IX . LISTADO DE BENS DO CATÁLOGO DE PATRIMONIO CULTURAL DE GALICIA DXOTU. Retrieved from https://cmatv.xunta.gal/c/document_library/get_file?file_path=/portal-cmaot/Documentos_SXOTU/PBA/20180827_10_Anexo_IX.II_BCPCG.pdf
- La Peña-Santos, A. de. (1969). Las representaciones de alabardas en los grabados rupestres gallegos. *Zephyrus*, 30/31, 115–129.

- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2017). 3-D Modelling of Historic Facades Using SfM Photogrammetry Metric documentation of different building types of a historic centre. *International Journal of Architectural Heritage*, 15583058.2017.1317884. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1317884>
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2018). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.10.009>
- Peppas, M. V., Mills, J. P., Moore, P., Miller, P. E., & Chambers, J. E. (2016). Accuracy assessment of a uav-based landslide monitoring system. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-895-2016>
- Peres, M. R. (2013). *The focal encyclopedia of photography*. Taylor & Francis.
- Pierrot Deseilligny, M., & Clery, I. (2012). Apero, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Set of Images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/(snavelly), 269–276. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-269-2011>
- Pires, H., Rubio, J. M., & Arana, A. E. (2015). Techniques for revealing 3D hidden archeological features: Morphological residual models as virtual-polynomial texture maps. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W4), 415–421. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-415-2015>
- Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., Ponchio, F., & Scopigno, R. (2015). 3DHOP: 3D Heritage Online Presenter. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 52(April 2014), 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.07.001>
- Le Quellec, J. L., Duquesnoy, F., & Defrasne, C. (2015). Digital image enhancement with DStretch®: Is complexity always necessary for efficiency? *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2(2–3), 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2015.01.003>
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Remondino, F., Pizzo, S. Del, & Kersten, T. P. (2012). Progress in Cultural Heritage Preservation, 7616(March). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9>

- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146). <https://doi.org/10.1111/phor.12063>
- Resco, P. A., Barrero, J. D. C., Díaz, M. F., & Serrano, P. M. M. (2014). "Involuntary Photogrammetry": rescuing 3D geometric information from library pictures. *Virtual Archaeology Review*, 5(10), 11–20.
- De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., et al. (2013a). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 1108–1121. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.040>
- De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., et al. (2013b). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 1108–1121. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.040>
- De Reu, J., De Smedt, P., Herremans, D., Van Meirvenne, M., Laloo, P., & De Clercq, W. (2014). On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science*, 41, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.08.020>
- Rodríguez Rellán, C., Vázquez Martínez, A., & Fábregas Valcarce, R. (2018). Cifras e imágenes: una aproximación cuantitativa a los petroglifos gallegos. *Trabajos de Prehistoria*, 75 (1), 109–127.
- Roelofs, R. (1950). Distortion, principal point, point of symmetry and calibrated principal point. *Photogrammetria*, 7, 49–66.
- Roncella, R., Re, C., & Forlani, G. (2012). Performance Evaluation of a Structure and Motion Strategy in Architecture and Cultural Heritage. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/(March), 285–292. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-5-w16-285-2011>
- Rusinkiewicz, S., Burns, M., & DeCarlo, D. (2006). Exaggerated shading for depicting shape and detail. *Acm Transactions on Graphics*, 25(3), 1199–1205. <https://doi.org/http://doi.acm.org/10.1145/1141911.1142015>
- Ružić, I., Marović, I., Benac, Č., & Ilić, S. (2014). Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia. *Geo-Marine Letters*. <https://doi.org/10.1007/s00367-014-0380-4>
- Saito, T., & Takahashi, T. (1990). Comprehensible rendering of 3-D shapes. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. <https://doi.org/10.1145/97880.97901>

- Salazar-Gamarra, R., Seelaus, R., da Silva, J. V. L., da Silva, A. M., & Dib, L. L. (2016). Monoscopic photogrammetry to obtain 3D models by a mobile device: a method for making facial prostheses. *Journal of Otolaryngology-Head & Neck Surgery*, 45(1), 33.
- Santagati, C., & Inzerillo, L. (2013). 123D Catch: Efficiency, Accuracy, Constraints and Limitations in Architectural Heritage Field. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(2), 263–289. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.2.2.263>
- Santagati, C., Inzerillo, L., & Paola, F. Di. (2013). Image-based modeling techniques for architectural heritage 3d digitalization: limits and potentialities. *The International Archives of ...*, XL(September), 2–6. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-555-2013>
- Santos-Estévez, M. (2015). Deer and Horses in Atlantic Rock Art: A Structural Analysis of Iconography in the Landscape. *Time and Mind*, 8(3), 257–277. <https://doi.org/10.1080/1751696X.2015.1066128>
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>
- Schneider, D., Schwalbe, E., & Maas, H. G. (2009). Validation of geometric models for fisheye lenses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.01.001>
- Scopigno, R., Callieri, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Potenziani, M. (2017). Delivering and using 3D models on the web: are we ready? *Virtual Archaeology Review*. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2017.8024856>
- Shortis, M. R., Snow, W. L., & Goad, W. K. (1995). Comparative Geometric Tests of Industrial and Scientific CCD Cameras using Plumb Line and Test Range Calibrations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Simpson, A., Clogg, P., Díaz-Andreu, M., & Larkman, B. (2004). Towards three-dimensional non-invasive recording of incised rock art. *Antiquity*, 78(301), 692–698. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00113328>
- Skarlatos, D., & Kiparissi, S. (2012). Comparison of Laser Scanning, Photogrammetry and Sfm-Mvs Pipeline Applied in Structures and Artificial Surfaces. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1-3(September), 299–304. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-1-3-299-2012>
- Sloan, P.-P., Martin, W., Gooch, A., & Gooch, B. (2001). The Lit Sphere: A Model for Capturing NPR Shading from Art. *Proceedings of Graphics Interface 2001 (Ottawa, Canada, 7--9 June 2001)*. <https://doi.org/http://doi.acm.org/10.1145/780986.781004>

- Snavely, N., Seitz, S., & Szeliski, R. (2006). Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D. *SIGGRAPH Conference Proceedings*, 835–846. <https://doi.org/10.1145/1141911.1141964>
- Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189–210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Spetsakis, M., & Aloimonos, J. Y. (1991). A Multi-Frame Approach to Visual Motion Perception. *International Journal of Computer Vision*, 6, 245–255.
- Stavroulaki, M. E., Riveiro, B., Drosopoulos, G. A., Solla, M., Koutsianitis, P., & Stavroulakis, G. E. (2016). Modelling and strength evaluation of masonry bridges using terrestrial photogrammetry and finite elements. *Advances in Engineering Software*, 101, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.12.007>
- Steinberg, F. (1996). Conservation and rehabilitation of urban heritage in developing countries. *Habitat International*. [https://doi.org/10.1016/0197-3975\(96\)00012-4](https://doi.org/10.1016/0197-3975(96)00012-4)
- Stojic, M., Chandler, J. H., Ashrnore, P., & Luce, J. (1998). The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*.
- Strecha, C., Küng, O., & Fua, P. (2012). Automatic Mapping from Ultra-Light UAV Imagery. *EuroCOW 2012*, 2–5.
- Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>
- Sužiedelytė-Visockienė, J., Bagdžiūnaitė, R., Malys, N., & Maliene, V. (2015). CLOSE - RANGE PHOTOGRAMMETRY ENABLES DOCUMENTATION OF ENVIRONMENT - INDUCED DEFORMATION OF ARCHITECTURAL HERITAGE. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(6), 1371–1381.
- Szeliski, R., & Sing Bing, K. (1993). Recovering 3D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1993. Proceedings CVPR '93., 1993 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 752–753). <https://doi.org/10.1109/CVPR.1993.341157>
- Szeliski, Richard, & Kang, S. B. (1994). Recovering 3d shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. <https://doi.org/10.1006/jvci.1994.1002>

- Teza, G., Pesci, A., & Ninfo, A. (2016). Morphological Analysis for Architectural Applications: Comparison between Laser Scanning and Structure-from-Motion Photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 142(3), 04016004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000172](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000172)
- Tingdahl, D., & Van Gool, L. (2011). A Public System for Image Based 3{D} Model Generation. *Lecture Notes in Computer Science*, 6930/2011, 262–273.
- Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., & Fitzgibbon, A. W. (2000). Bundle Adjustment A Modern Synthesis. In *Vision Algorithms '99* (Vol. 34099, pp. 298–372). https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21
- Trinchão Andrade, B., Mazetto Mendes, C., de Oliveira Santos, J., Pereira Bellon, O. R., & Silva, L. (2012). 3D preserving xviii century barroque masterpiece: Challenges and results on the digital preservation of Aleijadinho's sculpture of the Prophet Joel. *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.05.003>
- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2014). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738–2745. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>
- Tzedaki, V., & Kamara, J. M. (2013). Capturing As-Built Information for a BIM Environment Using 3D Laser Scanner: A Process Model. *Aei* 2013, 486–495. <https://doi.org/10.1061/9780784412909.047>
- Unesco. (1972). *Convención sobre la protección del patrimonio mundial , cultural y natural*. Unesco.
- Uygun, F., Turan, M. H., & Ocali, O. (2016). Photogrammetric evaluation options of an ancient monument for different survey levels. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8, 200–205.
- Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73, 539–543.
- Varela, J. M. V. (1982). Los petroglifos gallegos. *Zephyrus*, 36.
- Veiga, Y. S. (2005). Galician Rock Art, 5–19.
- Vergne, R., Pacanowski, R., Barla, P., Granier, X., & Schlick, C. (2010). Radiance Scaling for versatile surface enhancement. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games - I3D* 10, 143. <https://doi.org/10.1145/1730804.1730827>

- Vergne, R., Pacanowski, R., Granier, X., Reuter, P., Vergne, R., Pacanowski, R., et al. (2018). Enhancing surface features with the Radiance Scaling Meshlab Plugin To cite this version : HAL Id : hal-00877158.
- Vicente López, S. (2016). Mateo López y la planta de la iglesia monástica de San Martín Pinario de Santiago. *Archivo Español de Arte*, 89(353), 85–94. <https://doi.org/10.3989/aearte.2016.07>
- Wackrow, R., & Chandler, J. H. (2008). A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model. *Photogrammetric Record*. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2008.00467.x>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wilkinson, M. W., Jones, R. R., Woods, C. E., Gilment, S. R., McCaffrey, K. J. W., Kokkalas, S., & Long, J. J. (2016). A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition. *Geosphere*, 12(6), 1865–1880. <https://doi.org/10.1130/GES01342.1>
- Yang, J., Shi, Z. K., & Wu, Z. Y. (2016). Towards automatic generation of as-built BIM: 3D building facade modeling and material recognition from images. *International Journal of Automation and Computing*, 13(4), 338–349. <https://doi.org/10.1007/s11633-016-0965-7>
- Yastikli, N. (2007). Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 423–427. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.003>
- Yilmaz, H. M., Yakar, M., Gulec, S. A., & Dulgerler, O. N. (2007). Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 428–433. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.07.004>

